

LEONARDO FAGUNDES ROSEMBACK MIRANDA

**CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DA PRODUÇÃO E
CONTROLE DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM
AREIA RECICLADA LAVADA DE RESÍDUOS CLASSE A DA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do Título
de Doutor em Engenharia

SÃO PAULO

2005

LEONARDO FAGUNDES ROSEMBACK MIRANDA

**CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DA PRODUÇÃO E
CONTROLE DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM
AREIA RECICLADA LAVADA DE RESÍDUOS CLASSE A DA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e
Urbana

Orientador:
Prof^ª. Dr.^a. Sílvia Maria de Souza
Selmo

SÃO PAULO

2005

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 13 de dezembro de 2005

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Miranda, Leonardo Fagundes Rosembach

Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil. São Paulo, 2005.
439p. Edição Revisada.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana.

1. Controle de processo
 2. Revestimento
 3. Argamassa
 4. Entulho
 5. Reciclagem
- I.
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. T

a Deus,

*aos meus pais, Lício e Maria Aparecida,
por tudo*

AGRADECIMENTOS

Após 4 anos de extenso trabalho para realização desta pesquisa, realmente tenho muitos a quem agradecer.

Em primeiro lugar, agradeço à Prof. Dr.^a Sílvia Maria de Souza Selmo pela orientação, amizade, paciência e confiança no meu trabalho.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – e ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, que viabilizaram economicamente esta pesquisa.

Ao empresário João Batista Preto de Godoy, ao seu pai Sebastião e a todos os funcionários da usina de reciclagem Irmãos Preto Ltda. (principalmente ao Zé e ao Toninho), pessoas com as quais muito aprendi e que gentilmente me receberam. Apesar de todas as dificuldades que tivemos, eles acreditaram no meu trabalho, fazendo uma parceria que se tornou amizade.

Aos professores Vahan Agopyan e Arthur Chaves pelas contribuições dadas no Exame de Qualificação.

À Patrícia Rodrigues de Freitas, do setor de informática, pela atenção e amizade durante os 7 anos que a conheço.

Ao Edson Timóteo de Oliveira (Titi) e Rogério de Toledo, pela atenção.

Ao Maurício Real dos Santos que, sempre com boa vontade e bom humor, auxiliou-me na realização dos ensaios no laboratório durante toda a pesquisa, mostrando-se um ótimo laboratorista, e à Patrícia Castanho Galeni pelo auxílio em alguns trabalhos nas fases iniciais e final de caracterização complementar das amostras.

Ao Renato Augusto do Nascimento e sua família, que gentilmente cederam seu sítio para me alojar durante a realização da pesquisa em Socorro.

À equipe de técnicos da EPUSP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Reginaldo, Dorval, Adilson, João, Renata, Joaquim, Antônio, Mário e Edson, pelo auxílio prestado durante a fase experimental da pesquisa.

À Fátima, Cris, Alcione, Paulinho e, principalmente, à Engrácia, pela atenção nos trâmites acadêmicos e administrativos do Auxílio à Pesquisa que subsidiou esta tese.

À Fátima e à Leo pela ajuda nas consultas feitas na Biblioteca da Engenharia Civil.

À Associação Brasileira de Cimentos Portland – ABCP – pelo preço especial na realização de ensaios de caracterização de cimento.

Ao LCT, do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP, pelo atendimento e preço especial na realização das análises de granulometria a laser, difração e fluorescência de raios X.

Ao Silas Batista, pela ajuda e troca de experiências na fabricação de equipamentos para a pesquisa e serviços.

Ao setor de veículos da EPUSP, em especial ao Aparecido Rosa da Silva, pela presteza e ajuda.

Aos meus amigos da Poli e de Juiz de Fora que de alguma forma me apoiaram no sucesso deste trabalho, mesmo que sem perceber: Renata Bertolo, Fabiana, Priscila, Rita, Leo 6, Ângelo, André, Breno Pulica, César Frozô, Pedro Paulo, Pedro Kopschitz, Tonhão, Treko, Grilo, Yoakim, Clebão, Japagirl, Tutu, Tatá, Hudson, Fábio, Santovito, Marcos Mitre. Desculpem se esqueci de alguém.

À Patrícia, Bianca e Luciana, pela companhia, amizade e por tudo que aprendi com elas enquanto estivemos juntos.

À Mariana que, no final da minha tese, encheu a minha vida de alegria, dando-me os dois melhores presentes que eu poderia ganhar: sua companhia e o nosso filho.

Principalmente aos meus pais, Lício e Maria Aparecida Miranda, às minhas irmãs Carmem Lúcia e Cristiane, aos meus sobrinhos que eu adoro, Rafael, Carolina e Renan, aos meus cunhados Edilberto e Marcos, pelo apoio e alegrias nos momentos mais difíceis.

SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS E TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
1.1	IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA	1
1.2	OBJETIVOS DA TESE	3
1.3	CONTEÚDO E ESTRUTURA DA TESE	4
<u>2</u>	<u>RECICLAGEM DE RESÍDUOS CLASSE A DA CONSTRUÇÃO CIVIL</u>	<u>6</u>
2.1	DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	6
2.2	IMPORTÂNCIA DA RECICLAGEM	8
2.3	PANORAMA SOBRE A RECICLAGEM DE RCC NA EUROPA	9
2.3.1	Holanda	10
2.3.2	Itália	12
2.3.3	Alemanha	19
2.3.3.1	A usina de reciclagem da Buhck GmbH & Co. KG	20
2.3.3.2	Usina de reciclagem de RCC da Hermann Wellmann	21
2.4	PANORAMA SOBRE AS USINAS DE RECICLAGEM DE RCC NO BRASIL	22
2.4.1	Belo Horizonte/MG	24
2.4.2	Campinas/SP	29
2.4.3	Ciriaco/RS	30
2.4.4	Macaé/RJ	31
2.4.5	Piracicaba/SP	32

2.4.6	São Bernardo do Campo/SP.....	35
2.4.7	São Paulo/SP	37
2.4.8	Socorro/SP	39
2.4.9	Vinhedo/SP	43
2.4.10	Resumo dos dados sobre as usinas nacionais.....	45
2.5	PANORAMA DO MERCADO NACIONAL PARA AGREGADOS RECICLADOS E ASPECTOS RESTRITIVOS.....	47
2.5.1	Brita corrida reciclada para pavimentos	48
2.5.2	Agregados reciclados não lavados para concretos não estruturais.....	49
2.5.3	Agregados reciclados para concreto estrutural.....	52
2.5.4	Areia reciclada lavada e argamassas.....	53
2.6	GESTÃO DE RCC PARA A PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS	55
2.6.1	Verificação e transporte dos resíduos.....	55
2.6.2	Triagem de RCC.....	58
2.7	DIFICULDADES TÉCNICAS ENCONTRADAS NA RECICLAGEM.....	61
2.7.1	Variabilidade da composição de RCC.....	62
2.7.2	Presença de contaminantes.....	63
2.7.2.1	Limpeza e escavação de canteiros-de-obras.....	65
2.7.2.2	Madeiras.....	66
2.7.2.3	Metais ferrosos e não ferrosos.....	68
2.7.2.4	Betumes e derivados	69
2.7.2.5	Derivados de papel	70
2.7.2.6	Gesso e derivados	70
2.7.2.7	Materiais plásticos	72
2.7.2.8	Outros componentes e elementos de construção.....	72
2.7.3	Preconceitos quanto ao uso de agregados reciclados	73
2.8	RESÍDUOS CLASSE A DE INTERESSE PARA A PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS.....	74
2.8.1	Concretos	74
2.8.2	Materiais cerâmicos e resíduos mistos	78

2.9 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA RECICLAGEM DE RESÍDUOS CLASSE A DA CONSTRUÇÃO CIVIL	79
2.9.1 Alimentador vibratório	80
2.9.2 Grelha vibratória.....	81
2.9.3 Equipamentos de transporte	82
2.9.4 Separadores magnéticos.....	83
2.9.5 Britadores.....	85
2.9.6 Moinhos	88
2.9.7 Peneiras vibratórias.....	90
2.9.8 Equipamentos para processo de reciclagem via úmida	92
2.9.9 Equipamentos e técnicas para redução da variabilidade do RCC	97
2.10 ESPECIFICAÇÕES PARA O CONTROLE TECNOLÓGICO DE AGREGADOS RECICLADOS	100
2.10.1 Especificação brasileira – NBR 15116/04	101
2.10.2 Especificações holandesas – Hendriks; Janssen (2001)	106
2.10.3 Especificação RESIBA	108
2.10.4 Especificação alemã – DIN 4226-100/02	111
2.10.5 Especificação europeia – prEN 13139/01	113
2.10.6 Outras considerações relativas a contaminantes mais comuns em agregados reciclados de RCC.....	116
2.11 ALTERNATIVAS PARA O AUMENTO E A MELHORIA DA RECICLAGEM DE RCC ..	119
<u>3 PANORAMA DA TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS.....</u>	123
3.1 FUNÇÕES E CAMADAS DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSAS	123
3.2 FATORES INFLUENTES NO DESEMPENHO INICIAL E DURABILIDADE DOS REVESTIMENTOS	124
3.3 ANOMALIAS MAIS FREQUENTES EM REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA DE PAREDES E TETOS	127

3.4 MATERIAIS CONSTITUINTES E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS E REVESTIMENTOS.....	129
3.4.1 Cimento portland.....	130
3.4.2 Cal hidratada.....	131
3.4.3 Agregados miúdos naturais ou industriais.....	135
3.4.3.1 As especificações de agregados miúdos na década de 80.....	136
3.4.3.2 A especificação europeia atual de agregados miúdos para argamassas.....	142
3.4.4 Água de amassamento.....	143
3.4.5 Aditivos, adições e outros materiais alternativos.....	144
3.5 CLASSIFICAÇÕES, NORMAS E CONSIDERAÇÕES SOBRE ESPECIFICAÇÕES E DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS.....	144
3.5.1 Quanto à forma de produção.....	144
3.5.1.1 Argamassas industrializadas.....	144
3.5.1.2 Argamassas dosadas em central e outras.....	148
3.5.1.3 Argamassas dosadas em obra.....	148
3.5.2 Quanto à tecnologia de dosagem dos materiais constituintes.....	152
3.5.3 Quanto à especificação de propriedades.....	153
3.6 ARGAMASSAS E REVESTIMENTOS FEITOS COM AREIA RECICLADA DE RCC.....	162
3.6.1 Características das areias recicladas de RCC e influência nas argamassas.....	162
3.6.2 Argamassas de revestimento com areia reciclada de RCC.....	165
3.6.3 Revestimentos de argamassa com areia reciclada de RCC.....	168
3.6.4 Dosagem das argamassas.....	171
3.6.4.1 Trabalhabilidade e retração por secagem.....	171
3.6.4.2 Demais propriedades de desempenho.....	172
<u>4 AMOSTRAGEM PROBABILÍSTICA, CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO E EXEMPLOS PARA CONCRETOS E ARGAMASSAS</u>	173
4.1 AMOSTRAGEM.....	174
4.1.1 Métodos de amostragem.....	174

4.1.2	Definição da massa de cada amostra	176
4.1.3	Planos de amostragem aplicados a agregados reciclados	178
4.1.3.1	Critérios RESIBA	178
4.1.3.2	Critérios holandeses	179
4.2	NORMAS DE SISTEMAS DA QUALIDADE	180
4.3	CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP)	183
4.3.1	Folha de verificação.....	184
4.3.2	Gráfico de Pareto.....	185
4.3.3	Diagrama de causa e efeito	185
4.3.4	Estratificação.....	186
4.3.5	Diagrama de dispersão.....	186
4.3.6	Gráficos de controle.....	186
4.3.7	Estimativa da capacidade do processo.....	192
4.4	CONTROLE DE QUALIDADE NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS	195
4.5	CONTROLE DE QUALIDADE EM INDÚSTRIAS DE ARGAMASSAS	196

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO E CONTROLE DE PRODUÇÃO DE AREIA RECICLADA LAVADA PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO198

5.1	PREMISSAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO DA TESE.....	198
5.2	MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	202
5.2.1	Cimentos	202
5.2.2	Areias recicladas de RCC	202
5.2.2.1	Amostras de areias recicladas de RCC selecionado	204
5.2.2.2	Amostras de areias recicladas lavadas e não lavadas	207
5.2.3	Cal.....	209
5.2.4	Blocos de concreto e tijolos cerâmicos maciços	209
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS, ARGAMASSAS E REVESTIMENTOS	210
5.3.1	Caracterização das areias recicladas.....	210
5.3.2	Caracterização das argamassas.....	211

5.3.2.1	Método de mistura das argamassas.....	211
5.3.2.2	Caracterização das argamassas no estado anidro e fresco	212
5.3.2.3	Caracterização das argamassas no estado endurecido	214
5.3.3	Execução e análise de desempenho dos revestimentos	219
5.4	FASE 1: AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DE AREIAS RECICLADAS, DE ARGAMASSAS E DO DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS PRODUZIDOS PELA RECICLAGEM DE RCC ORIGINAIS, NÃO LAVADOS E OUTROS SELECIONADOS ..	221
5.5	FASE 2: AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DA EFICÁCIA DO CONTROLE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AREIAS RECICLADAS NA DIMINUIÇÃO DA VARIABILIDADE DAS ARGAMASSAS.....	224
5.6	FASE 3: AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DA EFICÁCIA DO CONTROLE DA NATUREZA E DO TEOR DE FINOS DE AREIAS RECICLADAS, POR LAVAGEM EM PENEIRA 0,15 MM, NA DIMINUIÇÃO DA VARIABILIDADE DAS ARGAMASSAS	225
5.7	FASE 4: AVALIAÇÃO EM CAMPO DA EFICÁCIA DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE RCC DE NATUREZA CERÂMICA OU MISTA, COM E SEM LAVAGEM EM PENEIRA DE 0,15 MM, NA DIMINUIÇÃO DA VARIABILIDADE DAS ARGAMASSAS	228
5.8	FASE 5: AVALIAÇÃO EM CAMPO DA EFICÁCIA DA LAVAGEM EM CLASSIFICADOR ESPIRAL E HOMOGENEIZAÇÃO DE AREIAS RECICLADAS, NA DIMINUIÇÃO DA VARIABILIDADE DAS ARGAMASSAS	233
5.9	PROPRIEDADES A SEREM CONTROLADAS E LIMITES DE ESPECIFICAÇÃO	238
5.10	FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	242

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....243

6.1	FASE 1: AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DE AREIAS RECICLADAS, DE ARGAMASSAS E DO DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS PRODUZIDOS PELA RECICLAGEM DE RCC ORIGINAIS, NÃO LAVADOS E OUTROS SELECIONADOS ..	243
6.1.1	Variabilidade das propriedades de areias recicladas não lavadas	243
6.1.2	Variabilidade das argamassas no estado fresco com areias recicladas não lavadas	248

6.1.3	Variabilidade das argamassas no estado endurecido com areias recicladas não lavadas.....	251
6.1.3.1	Resistência mecânica.....	251
6.1.3.2	Retração por secagem.....	254
6.1.3.3	Absorção capilar.....	256
6.1.4	Avaliação de desempenho dos revestimentos produzidos em Socorro/SP com areias recicladas não lavadas.....	259
6.1.5	Resumo dos resultados obtidos na Fase 1.....	262
6.2	FASE 2: AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DA EFICÁCIA DO CONTROLE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AREIAS RECICLADAS NA DIMINUIÇÃO DA VARIABILIDADE DAS ARGAMASSAS.....	263
6.3	FASE 3: AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DA EFICÁCIA DO CONTROLE DA NATUREZA E DO TEOR DE FINOS DE AREIAS RECICLADAS, POR LAVAGEM EM PENEIRA DE 0,15 MM, NA DIMINUIÇÃO DA VARIABILIDADE DAS ARGAMASSAS	266
6.3.1	Variabilidade das propriedades das areias recicladas lavadas em peneira de 0,15 mm, em laboratório.....	266
6.3.2	Variabilidade das argamassas no estado fresco com as areias recicladas lavadas em peneira de 0,15 mm, em laboratório.....	267
6.3.3	Variabilidade das argamassas no estado endurecido com as areias recicladas lavadas em peneira de 0,15 mm em, laboratório.....	269
6.3.3.1	Resistência mecânica.....	269
6.3.3.2	Retração por secagem.....	276
6.3.3.3	Absorção capilar de água.....	277
6.3.4	Avaliação de desempenho dos revestimentos produzidos em Socorro com areias recicladas lavadas em peneira de 0,15 mm e betoneira, em laboratório.....	279
6.3.5	Resumo dos resultados obtidos na Fase 3.....	283
6.4	FASE 4: AVALIAÇÃO EM CAMPO DA EFICÁCIA DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE RCC DE NATUREZA CERÂMICA OU MISTA, COM E SEM LAVAGEM EM PENEIRA DE 0,15 MM, NA DIMINUIÇÃO DA VARIABILIDADE DAS ARGAMASSAS.....	284

6.4.1	Variabilidade das areias recicladas obtidas através da classificação visual de RCC e lavagem em peneira vibratória.....	284
6.4.2	Variabilidade das argamassas no estado fresco, obtidas com o uso das técnicas de classificação visual do RCC e lavagem de areias recicladas em peneira vibratória.....	291
6.4.3	Variabilidade das argamassas no estado endurecido, obtidas com o uso das técnicas de classificação visual de RCC e lavagem das areias recicladas em peneira vibratória.....	295
6.4.4	Avaliação do desempenho dos revestimentos produzidos com o uso das técnicas de classificação visual do RCC e lavagem de areias recicladas em peneira vibratória.....	298
6.4.5	Resumo dos resultados obtidos na Fase 4.....	303
6.5	FASE 5: AVALIAÇÃO EM CAMPO DA EFICÁCIA DA LAVAGEM EM CLASSIFICADOR ESPIRAL E HOMOGENEIZAÇÃO DE AREIAS REICLADAS, NA DIMINUIÇÃO DA VARIABILIDADE DAS ARGAMASSAS.....	304
6.5.1	Variabilidade das areias recicladas obtidas através da lavagem em classificador espiral, com formação de pilhas de homogeneização.....	304
6.5.2	Variabilidade das argamassas no estado fresco, obtidas através da lavagem em classificador espiral e com formação de pilhas de homogeneização.....	309
6.5.3	Variabilidade das argamassas no estado endurecido, obtidas através da lavagem em classificador espiral e com formação de pilhas de homogeneização.....	314
6.5.3.1	Resistência mecânica.....	315
6.5.3.2	Módulo de elasticidade.....	319
6.5.3.3	Retração por secagem.....	320
6.5.3.4	Absorção capilar.....	322
6.5.3.5	Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	323
6.5.4	Avaliação de desempenho dos revestimentos produzidos em Socorro/SP com areias recicladas obtidas através da lavagem em classificador espiral e com formação de pilhas de homogeneização.....	325

6.5.5	Análise estatística dos resultados da Fase 5 e proposição de parâmetros para o controle de qualidade	331
6.5.6	Resumo da análise dos resultados obtidos na Fase 5.....	343

Z CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....346

7.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	346
7.2	PROPOSTA DE MÉTODO PARA PRODUÇÃO E CONTROLE DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS EM USINAS DE RECICLAGEM DE RCC CLASSE A	347
7.2.1	Quanto ao processo de reciclagem	347
7.2.2	Quanto à formação de lotes e plano de amostragem	350
7.2.3	Quanto às propriedades a serem analisadas e limites de especificação	352
7.2.4	Quanto à aceitação ou rejeição do lote	353
7.2.5	Quanto à verificação do problema – análise de causa e efeito.....	353
7.3	TRANSFERÊNCIA AO SETOR PRODUTIVO.....	356
7.4	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	357

ANEXOS.....359

ANEXO A.	CARACTERIZAÇÕES QUÍMICAS, FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CIMENTOS E DA CAL UTILIZADOS NA PESQUISA.....	360
ANEXO B.	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS DE AREIAS RECICLADAS DE RCC SELECIONADOS, OBTIDOS NA USINA DE RECICLAGEM DE SOCORRO/SP E UTILIZADOS NA FORMAÇÃO DE 10 COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS ESTUDADAS EM LABORATÓRIO NAS FASES 1 A 3	363
ANEXO C.	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS AREIAS RECICLADAS LAVADAS E NÃO LAVADAS, OBTIDAS NA USINA DE RECICLAGEM DE SOCORRO/SP – FASES 1, 4 E 5 DA PESQUISA.....	364
ANEXO D.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA A LASER DAS AMOSTRAS DE AREIA RECICLADA NÃO LAVADAS, LAVADAS E COM RCC SELECIONADO... ..	372

ANEXO E. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM AMOSTRAS DE AREIAS RECICLADAS, LAVADAS E NÃO LAVADAS, OBTIDAS NA USINA DE RECICLAGEM DE SOCORRO/SP	393
ANEXO F. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS CORPOS-DE- PROVA DE ARGAMASSA	399
ANEXO F. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS CORPOS-DE- PROVA DE ARGAMASSA	399
ANEXO G. UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS EM ARGAMASSAS E REVESTIMENTOS FEITOS COM AREIA RECICLADA	407
ANEXO H. TABELAS DE OBTENÇÃO DE NÚMEROS RANDÔMICOS PARA AMOSTRAGEM DE MATERIAIS - ASTM 3665/99	419
ANEXO I. ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS DA FASE 4 NA CONDIÇÃO SATURADO SUPERFÍCIE SECA, NOS TEMPOS DE 10 MINUTOS, 30 MINUTOS E 24 HORAS DE IMERSÃO.	420
ANEXO J. ORIENTAÇÃO PARA A MONTAGEM DE LABORATÓRIO DE CONTROLE DE AREIA RECICLADA E ARGAMASSAS.	421

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....423

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Usina de reciclagem Buko, em Zaandam, Holanda. a) Vista externa da usina. b e c) Equipamentos utilizados para reciclagem do RCC. d) Variabilidade da natureza do RCC (fotos do autor, 2001).....11
- Figura 2: Usina de reciclagem modelo na Itália, de sigla ROSE (BRESSI, 2003). ...13
- Figura 3: Exemplo de usina de reciclagem fixa, modelo ROSE, de propriedade da empresa LaCave, em Torino, Itália.17
- Figura 4: Exemplo de usina móvel de reciclagem de RCC utilizada na Itália.18
- Figura 5: Usina de reciclagem de RCC da empresa HME, em Hamburgo, Alemanha. (a) Entrada de resíduos de concreto, no processo de reciclagem. (b) Triagem de RCC por processo manual, semelhante ao hoje utilizado na separação de lixo doméstico.....21
- Figura 6: (a) Utilização do agregado reciclado como sub-base na rua Adelina Amaral Pongelupe, em Belo Horizonte/MG (PREFEITURA DE BH, 2003). (b) Calçamento da usina da Pampulha sendo realizado com bloquete reciclado produzido pela própria usina (2003) (fotos do autor).....25
- Figura 7: Usina de reciclagem de RCC, em Pampulha, Belo Horizonte/MG (2003). (a) Triagem de RCC. (b) Britador de impacto (fotos do autor).....25
- Figura 8: Usina de Estoril, BH (2003). (a) Entrada da usina, com aspersão de água em RCC. (b) leiras para triagem de RCC. (c) Vista lateral do britador de impacto. (d) e (e) Vistas aéreas da usina de Estoril (fotos do autor).....27
- Figura 9: Unidade de Recebimento de Pequenos Volumens - URPV da R. Barão Homem de Melo, n. 300, Belo Horizonte/MG (fotos do autor).....29
- Figura 10: Usina de reciclagem da Prefeitura de Campinas/SP (fotos do autor).30
- Figura 11: Usina móvel de reciclagem de RCC do município de Ciriáco/RS (CIDADE DE CIRÍACO, 2003).31
- Figura 12: Usina de reciclagem de RCC de Macaé.....32
- Figura 13: Equipamentos da usina de reciclagem de Piracicaba/SP (foto do autor)..33
- Figura 14: Materiais produzidos na usina de Piracicaba/SP. a) Areia reciclada para assentamento de tijolos. b) Agregado graúdo reciclado (fotos do autor).33
- Figura 15: Fabricação de componentes na usina de Piracicaba/SP. a) Maquinário. b) Blocos de vedação. c) Bloquetes (fotos do autor).34
- Figura 16: Centro de triagem de RCC de Piracicaba/SP (fotos do autor).35

Figura 17: Usina de reciclagem de São Bernardo do Campo/SP, de propriedade da empresa Urbem Tecnologia Ambiental (foto do autor).....	37
Figura 18: a) Detalhe da parte do britador de impacto. b) Detalhe do equipamento de separação magnética (UL-SEN, KAHN, 2002).....	38
Figura 19: Usina de reciclagem de Socorro/SP, de propriedade da Irmãos Preto Ltda, em agosto de 2001. a) RCC a ser reciclado. b) alimentação manual do britador com o RCC a ser reciclado. c) Agregado miúdo produzido como a reciclagem do RCC. d) Pá carregadeira transportando o RCC reciclado (fotos do autor).....	42
Figura 20: Usina de reciclagem de RCC de Vinhedo/SP. a) RCC em triagem. b) Equipamento de britagem. c) Peneira vibratória. d) Diferença de tonalidade entre os agregados reciclados tipos “cinza” e “vermelho” (fotos do autor).....	44
Figura 21: Alimentador vibratório (fotos do autor).....	81
Figura 22: Grelha vibratória (FURLAN, 2003).	82
Figura 23: Transportadores de correia (foto do autor).....	83
Figura 24: Separadores magnéticos suspensos e permanentes, de limpeza manual (a) e automática (b) (fotos do autor).	84
Figura 25: Britador de mandíbula tamanho 5030. (a) Vista lateral. (b) Vista superior mostrando a mandíbula fixa gasta (fotos de autor).	87
Figura 26: Moinho de martelos (fotos do autor).	89
Figura 27: Peneira vibratória inclinada (foto do autor).	90
Figura 28: Lavador de rosca duplo, em utilização na extração de areia de Amparo/SP (foto do autor).....	96
Figura 29: Exemplo de tanque de decantação utilizado na extração de areia de Amparo/SP (foto do autor).....	97
Figura 30: Comparação do teor de contaminantes presentes em amostras abaixo de 8 mm, nos casos de demolição por procedimento comum e demolição seletiva (RUCH <i>et al.</i> , 1997b).	121
Figura 31: Fatores influentes no desempenho de revestimentos externos de fachadas, associados às diversas etapas do processo construtivo de edifícios (SELMO, 1989).	125
Figura 32: Condicionantes do processo construtivo que podem influir no desempenho de revestimentos externos de argamassa.	126

Figura 33: Retração por secagem aos 28 dias das barras de argamassas preparadas com os plastificantes em pó, em função do teor total de finos < 75 µm, sendo a cura em câmara seca a 50% ± 4% U.R e o consumo médio de cimento igual a 144 kg/m³. (SELMO; BUCHER, 1990).....	141
Figura 34: Exemplo de processo de produção de argamassa industrializada. a) Dosagem. b) Mistura. c) Ensacamento. d) Controle e automação.	146
Figura 35: Revestimentos de argamassa produzidos com areia reciclada (MIRANDA, 2000).	170
Figura 36: Correlação entre a resistência à tração na flexão e o surgimento de microfissuras em revestimentos de argamassas com areia reciclada (MIRANDA; SELMO, 2005).	170
Figura 37: Organograma de resumo do programa experimental da tese.	201
Figura 38: Ensaio para determinação da consistência da argamassa, conforme a NBR 13276/95.....	213
Figura 39: Determinação da densidade de massa da argamassa no estado fresco, conforme a NBR 13278/95.	213
Figura 40: Equipamento utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova de dimensões 4 x 4 x 16 cm, utilizados nos ensaios mecânicos de tração na flexão e compressão.....	215
Figura 41: Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm, com vão livre de 10 cm, conforme a EN 1015-11/93 (MIRANDA, 2000).	216
Figura 42: Ensaio de resistência à compressão em metades dos corpos-de-prova de flexão de 4 x 4 cm, sendo 8 cm o comprimento aproximado, conforme a EN 1015-11/93 (MIRANDA, 2000).....	216
Figura 43: Aparelho comparativo da NBR 8490/84 usado para medida de retração linear por secagem em corpos-de-prova de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm (MIRANDA, 2000).....	217
Figura 44: Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.....	219
Figura 45: Exemplos de fissuras: a) fissuras visíveis com revestimento seco; b) painel com muitas fissuras visíveis apenas com o revestimento molhado.	220
Figura 46: Ensaio de resistência de aderência à tração, com equipamento Dinateste, em revestimento de areia reciclada em Socorro/SP.....	221
Figura 47: Fluxograma da usina de reciclagem utilizado para obtenção das amostras não lavadas S1 NL a S22 NL, Fase I.	222

Figura 48: Fluxograma do processo de reciclagem utilizado na Fase 4 da pesquisa.	230
Figura 49: Processo de reciclagem adotado na Fase 4 da pesquisa para obtenção das amostras S26 a S45. a) Alimentação manual, britagem, peneiramento, moagem e peneiramento a úmido. b) Lado esquerdo: amostras NL. Lado direito: caçambas utilizadas como tanque de imersão dos materiais provenientes do peneiramento a úmido (areia lavada e lodo). c) “Chuveirão” utilizado para peneiramento a úmido e lavagem dos agregados provenientes do moinho.	231
Figura 50: Classificador espiral utilizado na Fase 5 da pesquisa.	236
Figura 51: Locação de cada amostra nas pilhas de homogeneização.	236
Figura 52: Desenho esquemático da aplicação de argamassas com as amostras de areia reciclada das pilhas P3 a P12 na usina de Socorro/SP em substrato de bloco de concreto.	237
Figura 53: Paredes externas do asilo de Socorro/SP revestido com argamassa de RCC deste projeto.	238
Figura 54: Curvas granulométricas das 10 composições de areias recicladas de RCC selecionados obtidos em Socorro/SP.	245
Figura 55: Distribuição granulométrica das amostras não lavadas de areias recicladas de Socorro/SP.	247
Figura 56: Correlação entre a relação água/cimento total e o teor total de finos < 75 µm dos agregados, para as 10 composições de argamassas com areias recicladas de RCC selecionados de Socorro/SP (T1 a T10, Fase 1).	249
Figura 57: Correlação entre a relação água/cimento total das 10 composições de argamassas e a absorção de água das areia recicladas de RCC selecionados de Socorro/SP (T1 a T10, Fase 1).	249
Figura 58: Baixa correlação entre a relação água/cimento total e o teor total de finos < 75 µm das argamassa feitas com 20 amostras não lavadas de areias recicladas de Socorro/SP.	251
Figura 59: Correlação entre as resistências mecânicas (tração na flexão e compressão) e as relações a/c (totais e efetivas), aos 28 dias de idade, com as 10 argamassas de composições de RCC selecionados (T1 a T10), na proporção 1:8.	252
Figura 60: Relação entre a resistências à compressão e a relação a/c total, aos 28 dias de idade, para 20 argamassas de areias recicladas não lavadas, dosadas na proporção 1:8.	254

- Figura 61: Retração por secagem das argamassas feitas com areias recicladas de RCC selecionados (1:8 em massa) segundo a NBR 8490/84, em função da idade. Barras mantidas em câmara úmida até 7 dias e após em câmara seca (U.R.= 55% ± 10% e T = 25 °C ± 5 °C).....255
- Figura 62: Retração por secagem das argamassas feitas com areias recicladas não lavadas originais de Socorro/SP (1:8 em massa) segundo a NBR 8490/84 em função da idade. Barras mantidas em câmara úmida até 7 dias e após em câmara seca (U.R.= 55% ± 10% e T = 25 °C ± 5 °C)256
- Figura 63: Absorção capilar das argamassas feitas com areias recicladas de RCC selecionados, na proporção 1:8 em massa, na metade dos corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm.....257
- Figura 64: Relação entre a absorção capilar de água das argamassas com areias recicladas de RCC selecionados e a absorção de água teórica destes agregados.....258
- Figura 65: Absorção capilar das argamassas com areias recicladas não lavadas originais de Socorro/SP, na metade dos corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm.258
- Figura 66: Revestimentos feitos com areia reciclada não lavada na usina de Socorro/SP, em substrato de tijolo cerâmico maciço (a) e de bloco de concreto (b).....260
- Figura 67: Correlação entre as resistências mecânicas e a relação a/c total para as argamassas produzidas com controle granulométrico pelo DTU 26.1/76 das composições de areias recicladas de RCC selecionados, com argamassas na proporção 1:8 (cimento, areia reciclada).....265
- Figura 68: Distribuição granulométrica teórica das 10 composições de areias recicladas passantes na peneira de 1,2 mm e lavadas em laboratório na peneira de 0,15 mm.....266
- Figura 69: Resultados de caracterização das argamassas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório, na proporção 1: 1: 8.....271
- Figura 70: Distribuição aproximadamente normal dos resultados de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas feitas com as amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (S1 LL a S25 LL).....272
- Figura 71: Gráfico de controle para amplitude da resistência à compressão de argamassas produzidas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (LL), na peneira de abertura de malha 0,15 mm.272
- Figura 72: Gráfico de controle para a média da resistência à compressão das argamassas produzidas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (LL), na peneira de abertura de malha 0,15 mm.273

Figura 73: Gráfico de controle para a amplitude da resistência à tração na flexão das argamassas produzidas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (LL), na peneira de 0,15 mm.....	274
Figura 74: Gráfico de controle para a média da resistência à tração na flexão das argamassas produzidas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (LL), na peneira de 0,15 mm.....	274
Figura 75: Retração por secagem das 10 argamassas feitas com areias recicladas de RCC selecionados e lavados em laboratório e com uso de cal (1: 1: 8 em massa) segundo a NBR 8490/84 em função da idade. Barras mantidas em câmara úmida até 7 dias e após em câmara seca (U.R.= 55% ± 10% e T = 25 °C ± 5 °C).....	276
Figura 76: Retração por secagem das argamassas feitas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório e com uso de cal (1: 1: 8 em massa) segundo a NBR 8490/84, em função da idade. Barras mantidas em câmara úmida até 7 dias e após em câmara seca (U.R.= 55% ± 10% e T = 25 °C ± 5 °C).....	277
Figura 77: Absorção capilar das argamassas feitas com areia reciclada lavada em laboratório de RCC selecionado, na proporção 1:1:8 em massa (cimento, cal e areia lavada), na metade dos corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm. .	278
Figura 78: Absorção capilar das argamassas feitas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório, na proporção 1:1:8 em massa (cimento, cal e areia reciclada lavada), na metade dos corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm.	279
Figura 79: Revestimento feito com a amostra S21 LL e cal, na proporção 1:1:10 (cimento: cal: areia reciclada úmida), com acabamento liso, resistente e sem fissuras.	280
Figura 80: Distribuição granulométrica das amostras de areias recicladas lavadas da Fase 4, S26 LU a S45 LU.	286
Figura 81: Resultados da Fase 4 dos teores de finos < 75 µm por diversos métodos de caracterização.	287
Figura 82: Absorção de água de 12 amostras de areias recicladas lavadas em peneira vibratória, durante a Fase 4, em diferentes tempos de imersão em água.	290
Figura 83: Correlação entre a densidade de massa fresca e o teor de ar aprisionado para as argamassas feitas com 20 amostras de areias recicladas lavadas em peneira vibratória, na Fase 4.....	293
Figura 84: Gráfico de controle da média para a consistência, com diversos pontos excedendo os limites de controle.....	294

Figura 85: Correlação entre a consistência das argamassas e a absorção de água das 20 amostras de areia reciclada lavada (LU) em peneira vibratória.	295
Figura 86: Gráfico de controle da média para a resistência à tração na flexão, com 3 pontos excedendo os limites de controle.	297
Figura 87: Gráfico de controle da média para a resistência à compressão, com diversos pontos excedendo os limites de controle.	297
Figura 88: Correlação entre a resistência mecânica e o teor total de finos < 75 µm das argamassas com areias recicladas lavadas na usina (LU) e não lavadas (NL), na Fase 4 da pesquisa.	298
Figura 89: Revestimentos produzidos durante a Fase 4 da pesquisa com areias recicladas obtidas através da lavagem em peneira vibratória. Substrato de bloco de concreto com chapisco, espessura dos revestimentos de 1,5 cm.	299
Figura 90: Fissuração dos revestimentos produzidos na Fase 4, em função do teor total de finos < 75 µm das argamassas.	301
Figura 91: Correlação entre a resistência de aderência dos revestimentos ao substrato de bloco de concreto com chapisco e a densidade de massa fresca das argamassas da Fase 4, desconsiderando-se o resultado expúrio do revestimento 2.	302
Figura 92: Correlação entre a absorção capilar dos revestimentos e a relação a/c total das argamassas.	302
Figura 93: Distribuição granulométrica de uma das 3 sub-amostras constituintes de cada pilha da Fase 5.	306
Figura 94: Resultados de absorção de água de todas as 30 sub-amostras da Fase 5, sendo que cada 3 resultados se referem a amostra representativa de uma pilha, no total das 10 formadas.	307
Figura 95: Comparação entre os teores de finos < 75 µm dos agregados lavados obtidos pelos métodos laser (meio álcool e água) e NBR 7219/87.	308
Figura 96: Correlação entre o índice de consistência das argamassas e a absorção de água das amostras de areia reciclada da Fase 5, para 27 das 30 sub-amostras obtidas.	310
Figura 97: Correlação entre o índice de consistência das argamassas e a relação água efetiva / teor total de finos < 75 µm. Para a correlação de 0,72 foram desconsiderados os 3 pontos discrepantes relativos à pilha P7.	311
Figura 98: Correlação entre o índice de consistência das argamassas e o teor de ar aprisionado.	311

Figura 99: Correlação entre a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar aprisionado.....	313
Figura 100: Resistências mecânicas das argamassas na proporção 1: 1: 8, aos 28 dias, com diferentes temperaturas de secagem em estufa.....	316
Figura 101: Relação entre a resistência mecânica aos 28 dias e o teor de ar aprisionado das argamassas.....	317
Figura 102: Correlação entre a densidade de massa endurecida e a resistência mecânica aos 28 dias das argamassas de cimento, cal e agregados reciclados lavados e homogeneizados.....	318
Figura 103: Variação do módulo de elasticidade dinâmico médio em função da idade, para as argamassas feitas com as 10 pilhas de agregados reciclados lavados em classificador espiral e homogeneizados.....	319
Figura 104: Correlação entre as resistência mecânicas e o módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias de idade, para as 10 argamassas feitas com agregados reciclados lavados (LU) em classificador espiral e homogeneizados.....	320
Figura 105: Retração por secagem das argamassas com o tempo, para agregados reciclados lavados em classificador espiral e homogeneizados.....	321
Figura 106: Correlação entre a retração por secagem aos 30 dias e a densidade de massa endurecida.....	322
Figura 107: Variação da absorção capilar das argamassas feitas com agregados lavados em classificador espiral e homogeneizados, com o tempo.....	323
Figura 108: Correlação entre a resistência à compressão e o diâmetro médio dos poros dos corpos-de-prova de argamassa com areias recicladas lavadas (Fase 5).....	324
Figura 109: Correlação entre o módulo de elasticidade e o diâmetro médio dos poros dos corpos-de-prova de argamassa com areias recicladas lavadas (Fase 5).....	324
Figura 110: Volume de poros das argamassas com maiores resistências à compressão (S64 LU e S70 LU) e também menores resistências (S61 LU e S67 LU), em função do diâmetro dos poros.....	325
Figura 111: Vista completa da parede externa de 40 m ² executada utilizando os agregados reciclados lavados em classificador espiral e homogeneizados.....	327
Figura 112: Correlação entre a fissuração visível encontrada nos revestimentos e o teor total de finos < 75 µm do agregado reciclado lavado e homogeneizado.....	328

- Figura 113: Correlação entre o grau de fissuração dos revestimentos e a porosidade total medida por porosimetria de mercúrio, com correlação de 0,905 quando se desconsidera o ponto expúrio P5.328
- Figura 114: Revestimentos de argamassa com areias recicladas lavadas e homogeneizadas. (a) Presença de microfissuras e de fissuras verticais e horizontais coincidentes com a junta de assentamento, visíveis com umedecimento e logo após a molhagem. (b) Revestimento de argamassa após 1 minuto da molhagem, sem a presença de microfissuras.....329
- Figura 115: Revestimento de argamassa aplicado no teto de asilo da cidade de Socorro/SP, com areia reciclada lavada da Fase 5 desta pesquisa.....331
- Figura 116: Gráficos de controle da amplitude, com 2 pontos excedendo os limites de controle para o teor de finos < 75 µm.....335
- Figura 117: Gráficos de controle da média, com diversos pontos excedendo os limites de controle para todas as propriedades.....336
- Figura 118: Modelo de usina de reciclagem para produção de argamassas. (a) Processo para produção de agregados reciclados a partir de RCC de concreto. (b) Processo de lavagem da brita corrida de origem em RCC cerâmico para a produção de areia reciclada lavada ou argamassas.350
- Figura 119: Diagrama de causa e efeito para o diagnóstico de anomalias em revestimentos de argamassa de areia reciclada lavada, segundo o modelo e o processo de reciclagem proposto.355
- Figura 120: Variação da densidade de massa das argamassas com a amostra S4 NL de Socorro/SP, na proporção 1:6, com os aditivos T e D, em função do tempo de agitação na argamassadeira.....413
- Figura 121: Variação da densidade de massa das argamassas com a amostra real S6 de Socorro/SP, na proporção 1:6, com os aditivos H e M, em função do tempo de agitação na argamassadeira.....414
- Figura 122: Manutenção de consistência das argamassas com T e D, na proporção 1:6.414
- Figura 123: Verificação do surgimento de fissuras em revestimentos de argamassa feitos com amostras não lavadas de areia reciclada de Socorro/SP, em blocos de concreto com chapisco. a) Argamassa na proporção 1: 8 em massa sem aditivo. b) Argamassa 1: 6 com IAR T no teor 0,10%. c) Argamassa 1: 6 com IAR D, no teor de 40 ml por m³.....416
- Figura 124: Revestimentos de argamassa produzidos na usina de Socorro com o uso de cimento CP III 40 RS, areia reciclada não lavada e aditivos. (a) Argamassa com aditivo E 1,5%, todo fissurado. (b) Argamassa com aditivo G 0,5%, praticamente sem fissuras.....417

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Massa de RCC gerada em algumas cidades do estado de São Paulo (SINDUSCON-SP, 2005).	9
Tabela 2: Características das usinas de Pampulha e Estoril, Belo Horizonte/MG.	28
Tabela 3: Resumo das principais características técnicas de algumas das usinas de reciclagem de RCC brasileiras.	45
Tabela 4: Comparativo das características da usina privada Urbem em São Bernardo do Campo e do modelo ROSE na Itália.	46
Tabela 5: Consumo de areia na RMSP.	47
Tabela 6: Áreas de destinação de RCC e condições para sua utilização, adaptado de SINDUSCON-SP (2005).	57
Tabela 7: Composição de RCC em diversos locais do Brasil e no estrangeiro, em %.	63
Tabela 8: Alternativas sustentáveis para o tratamento ou destinação dos resíduos de solos, produzidos pela limpeza e escavação de canteiros-de-obras.	66
Tabela 9: Alternativas sustentáveis para lidar com resíduos de madeira da construção civil.	67
Tabela 10: Alternativas sustentáveis para o tratamento de metais ferrosos e não ferrosos em RCC.	68
Tabela 11: Alternativas sustentáveis para o tratamento de asfaltos em RCC.	70
Tabela 12: Alternativas sustentáveis para o tratamento de papelão em RCC.	70
Tabela 13: Alternativas sustentáveis para a manipulação de painéis de gesso em RCC.	71
Tabela 14: Alternativas para a destinação de materiais plásticos em RCC.	72
Tabela 15: Alternativas para o tratamento de resíduos da produção de concreto.	75
Tabela 16: Ações recomendáveis para o tratamento de resíduos cerâmicos em RCC.	78
Tabela 17: Ângulo de inclinação da peneira em função da abertura da malha, conforme recomendação da FAÇO (1994).	91
Tabela 18: Tabelas de frequência e amplitudes para peneiras vibratórias convencionais, conforme recomendação da FAÇO (1994).	91

Tabela 19: Comportamento do material sobre uma dada peneira (CHAVES; PERES, 1999).....	92
Tabela 20: Requisitos gerais para agregado reciclado destinado à pavimentação, conforme a NBR 15116/04.	102
Tabela 21: Requisitos específicos para agregado reciclado destinado à pavimentação, conforme à NBR 15116/04.	103
Tabela 22: Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concretos sem função estrutural, conforme a NBR 15116/04.	103
Tabela 23: Determinação do tipo e frequência de execução de ensaios para caracterização e controle de agregados reciclados, conforme a NBR 15116/04.....	105
Tabela 24: Área de uso dos agregados reciclados (HENDRIKS; JANSSEN, 2001 ²).	107
Tabela 25: Sumário dos requisitos de composição dos agregados reciclados (HENDRIKS; JANSSEN, 2001 ²).	108
Tabela 26: Propriedades, métodos e frequência de testes a serem realizados em gregados reciclados de concreto, conforme o Programa RESIBA (MEHUS <i>et al.</i> , 2002).....	109
Tabela 27: Classificação e especificações de agregados reciclados de concreto, pelo Programa RESIBA. Constituintes calculados como porcentagem de massa (MEHUS <i>et al.</i> , 2002).	110
Tabela 28: Classificação de agregados reciclados em função de sua composição, conforme a norma alemã DIN 4226-100/02.	111
Tabela 29: Densidade de massa específica e absorção de água após 10 minutos para agregados pétreos reciclados (DIN 4226-100/02).	112
Tabela 30: Frequências mínimas para caracterização geral dos agregados, conforme a DIN 4226-100/02.....	112
Tabela 31: Valores máximos de contaminantes químicos permitidos nos agregados reciclados, conforme a DIN 4226-100/02.....	113
Tabela 32: Teor de finos < 63 µm máximo admissível no agregado em função da aplicação, conforme a prEN 13138/01.	114
Tabela 33: Frequência mínima de testes em agregados para argamassas, para laudos de certificação por terceiros.	115

Tabela 34: Especificação de propriedades e de limites para uso de agregados reciclados em concretos ou argamassas por diversos órgãos e pesquisadores.	117
Tabela 35: Limites de sulfatos para agregados em mistura com cimento Portland (AGUIAR, 2004).	118
Tabela 36: Níveis de contaminação e danos esperados para a ação de sulfatos, em materiais de construção, por critérios do IGS. (SEELE <i>et al.</i> , 2004).	118
Tabela 37: Anomalias em revestimentos de argamassa: possíveis causas e etapa de origem, no processo construtivo. CINCOTTO <i>et al.</i> (1995).	128
Tabela 38: Anomalias em revestimentos de argamassa: possíveis causas e etapa de origem, no processo construtivo. CINCOTTO <i>et al.</i> (1995).	129
Tabela 39: Influência do teor de cal e de cimento nas propriedades das argamassas.	133
Tabela 40 – Critérios granulométricos empíricos de documentos técnicos brasileiros, para agregados miúdos de argamassas de revestimento, da década de 80 (SELMO, 1986).	138
Tabela 41 – Requisitos e critérios prescritivos, quanto à presença de materiais deletérios em agregados miúdos para argamassas de revestimento, reunidos em SELMO (1986).	138
Tabela 42: Limites de porcentagem passante acumulada para areias de argamassas definidas por várias normas, na década de 80.	139
Tabela 43: Influência das características dos agregados nas propriedades das argamassas (SABBATINI, 1986).	139
Tabela 44: Vantagens de argamassa industrializada em relação à tradicional (REGATIERI, 2002).	147
Tabela 45: Diferenciação de conceitos entre outros tipos de argamassa quanto às condições de preparo e dosagem.	148
Tabela 46: Traços empíricos básicos, em volume, para argamassas de revestimento dosadas em obra, com agregados miúdos naturais e aglomerantes de qualidade controlada. Tabela extraída da antiga NBR 7200/82 (SELMO, 2002).	150
Tabela 47: Revestimentos internos e respectivos traços empíricos básicos, em volume, para argamassas de revestimento dosadas em obra, da antiga NBR 7200/82 (SELMO, 2002).	151

Tabela 48: Revestimentos externos e respectivos traços empíricos básicos, em volume, para argamassas de revestimento dosadas em obra, da antiga NBR 7200/82 (SELMO, 2002).	152
Tabela 49: Tabela da classificação francesa original, de propriedades identificadas pelo código MERUC e que inspiraram a atual especificação brasileira, de forma também estendida para argamassas de assentamento, pela NBR 13281/05.	156
Tabela 50: Critérios do projeto prEN 998-1/93, para as argamassas de revestimento de paredes e tetos de edifícios, no caso de serem racionalizadas (“designed mortars”). Selmo <i>et al</i> (2002).	156
Tabela 51: Propriedades das argamassas de revestimento e de assentamento, em projetos de normas européias, prEN 998-1/93 e prEN998-2/93, respectivamente. (SELMO <i>et al.</i> , 2002).	158
Tabela 52: Classificação das argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos., conforme a NBR 13281/05.	159
Tabela 53: Procedimento de inspeção de recebimento de argamassas industrializadas e dosadas em obra ou central, conforme a NBR 13281/05.	160
Tabela 54: Mecanismos de controle da qualidade (HELENE; TERZIAN, 1992).	173
Tabela 55: Tamanho mínimo de sub-amostras (HENDRIKS; JANSSEN, 2001 ³).	179
Tabela 56: Número mínimo de sub-amostras por amostra e número de amostras por lote (HENDRIKS; JANSSEN, 2001 ³).	180
Tabela 57: Sequência de operações para aplicação da NBR 5429/85 (NBR 5430/85).	183
Tabela 58: Valores de z para diversas porcentagens de falhas permitidas.	196
Tabela 59: Limites de variação de diversas propriedades de argamassas definidos por indústrias de argamassas industrializadas.	197
Tabela 60: Areias recicladas de RCC obtidas na usina de Socorro/SP e utilizadas na pesquisa.	204
Tabela 61: Composições de agregado de RCC selecionados a serem utilizadas para avaliar a influência da natureza dos resíduos nas propriedades das argamassas.	207
Tabela 62: Ensaios de caracterização realizados nos agregados reciclados utilizados na pesquisa.	211
Tabela 63: Propriedades de agregados, argamassas e revestimentos caracterizadas durante a Fase 1 da pesquisa.	223

Tabela 64: Distribuições granulométricas das composições testadas na Fase 2 da pesquisa, sendo a distribuição da norma BS 5262/76 relativa ao agregado e a distribuição da norma DTU 26.1/78 relativa à argamassa.....	224
Tabela 65: Ensaios realizados na etapa de controle da natureza e teor de partículas < 0,15 mm.	227
Tabela 66: Ensaios realizados durante a Fase 4 da pesquisa.....	232
Tabela 67: Ensaios em realização na Fase 5 da pesquisa.	235
Tabela 68: Propriedades a serem controladas e limites de variação.....	241
Tabela 69: Variabilidade das propriedades físicas das composições de areias recicladas.....	244
Tabela 70: Resultados de variabilidade das propriedades físicas das amostras de areias recicladas não lavadas de Socorro/SP (S1 NL a S25 NL), para um total de 20 amostras. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C1.	245
Tabela 71: Resumo dos resultados de caracterização no estado fresco das 10 composições de argamassa com areias recicladas selecionadas, na proporção 1:8 (cimento CP III 40 RS e areia reciclada selecionada).....	248
Tabela 72: Variabilidade das propriedades no estado fresco das argamassas feitas com 20 amostras de areia reciclada não lavada (S1 NL a S25 NL), obtidas em Socorro/SP, na proporção 1:8 (cimento CP III 40 RS e areia reciclada). Os resultados individuais das amostras estão no Anexo E1.250	
Tabela 73: Resumo dos resultados de resistência mecânica das 10 composições de argamassa com areias recicladas de RCC selecionados (T1 a T10), na proporção 1:8 (cimento CP III 40 RS e RCC selecionados), aos 28 dias de idade. Os resultados individuais das composições estão no Anexo F1.	252
Tabela 74: Variabilidade das propriedades no estado endurecido das argamassas feitas com 20 amostras de areias recicladas não lavadas (S1 NL a S25 NL), na proporção 1:8 (cimento CP III 40 RS e areia reciclada). Os resultados individuais das amostras estão no Anexo F4.....	253
Tabela 75: Resultados da execução de revestimentos de argamassa com areias recicladas não lavadas originais de Socorro/SP.	261
Tabela 76: Variabilidade no estado fresco e endurecido das argamassas produzidas com areias recicladas selecionadas de Socorro/SP, com distribuição granulométrica conforme a norma DTU 26.1 (proporção 1:8). Ensaio de resistência mecânica aos 28 dias de idade.	264

Tabela 77: Variabilidade das propriedades físicas de 6 amostras de areias recicladas lavadas em laboratório. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C2.....	267
Tabela 78: Variabilidade das propriedades no estado fresco das 10 composições de argamassas produzidas com areias recicladas de RCC selecionados e lavados em laboratório (proporção 1:1:8, CP III 40 RS, cal CH III e areia reciclada lavada).....	268
Tabela 79: Variabilidade das propriedades da argamassas no estado fresco feitas com 20 amostras de areias recicladas lavadas em laboratório, a partir de agregados originais da usina, na proporção 1: 1: 8 em massa seca (CP III 40 RS, cal CH III e areia reciclada lavada). Os resultados individuais das amostras estão no Anexo E2.	269
Tabela 80: Variabilidade das propriedades de resistência mecânica das argamassas feitas com as 10 composições de areias recicladas de RCC selecionados e lavados em laboratório, com cal, na proporção 1:1:8 em massa seca, aos 28 dias de idade. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo F2.....	270
Tabela 81: Variabilidade das propriedades de resistência mecânica das argamassas feitas com 20 amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (S1 LL a S25 LL), com cal, na proporção 1:1:8 em massa seca, aos 28 dias de idade. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo F5.	270
Tabela 82: Estimativa da capacidade do processo para as duas propriedades mecânicas.....	275
Tabela 83: Resultados da execução de revestimentos de argamassa com areias recicladas lavadas em betoneira e em peneira de 0,15 mm, na usina de Socorro/SP.....	282
Tabela 84: Variabilidade das amostras de areias recicladas não lavadas, S26 NL a S45 NL, obtidas na Fase 4 da pesquisa. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C1.	284
Tabela 85: Variabilidade das amostras de areias recicladas lavadas, S26 LU a S45 LU, obtidas na Fase 4 da pesquisa. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C2.....	285
Tabela 86: Variabilidade das propriedades no estado fresco das argamassas feitas com 20 amostras de areias recicladas não lavadas, S26 NL a S45 NL, com H total de 27,8% e relação água/cimento igual a 2,5. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo E1.	291
Tabela 87: Variabilidade das propriedades no estado fresco das argamassas feitas com 20 amostras de areia reciclada lavada, S26 LU a S45 LU, com relação água/cimento igual a 2,6 e na proporção 1:1:8 em massa seca	

(cimento, cal, areia lavada). Os resultados individuais das amostras estão nos Anexos E2 e E3.....	292
Tabela 88: Variabilidade das propriedades no estado endurecido das argamassas feitas com as amostras S26 a S45, lavadas e não lavadas, com relação a/c das argamassas fixa em 2,5 para as amostras NL e em 2,6 para as amostras LU. Os resultados individuais das amostras estão nos Anexos F4 e F6.....	296
Tabela 89: Resultados de caracterização das argamassas e revestimentos produzidos durante a Fase 4 da pesquisa, com areias recicladas obtidas por lavagem em peneira vibratória.....	300
Tabela 90: Variabilidade das 10 propriedades de 10 pilhas de areias recicladas produzidas na usina de Socorro/SP, com a aplicação das técnicas de lavagem em classificador espiral e formação de pilhas de homogeneização. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C2.....	305
Tabela 91: Variabilidade das propriedades no estado fresco das argamassas feitas com 10 pilhas de homogeneização de areia reciclada lavada em classificador espiral. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo E2.....	309
Tabela 92: Caracterização das argamassas no estado endurecido feitas com as 10 pilhas de areias recicladas produzidas na usina de Socorro, com a aplicação das técnicas de lavagem em classificador espiral e formação de pilhas de homogeneização. Os resultados individuais de resistência mecânica das amostras estão no Anexo F7.....	315
Tabela 93: Caracterização dos agregados reciclados e das argamassas utilizadas na produção de revestimentos na Fase 5.....	326
Tabela 94: Resumo do desempenho dos revestimentos aplicados em obra de asilo público na cidade de Socorr/SP.....	331
Tabela 95: Resultados de caracterização das 30 amostras de argamassas e agregado reciclados da Fase 5.....	333
Tabela 96: Propriedades a serem controladas e limites de especificação.....	338
Tabela 97: Importância do controle de cada propriedade e método de definição de cada intervalo de variação adotado na Tabela 96.....	340
Tabela 98: Nível de qualidade atingido para os limites de especificação adotados na Fase 5.....	341
Tabela 99: Controle de aceitação e rejeição da Pilha 1 de areia lavada e homogeneizada da Fase 5.....	342

Tabela 100: Resumo comparativo dos resultados obtidos nas Fases 4 e 5 da pesquisa.	345
Tabela 101: Sistema de comutação entre os regimes de inspeção no controle de qualidade, adaptado da NBR 5429/85.	352
Tabela 102: Propriedades a serem controladas e limites de especificação para controle de produção.	352
Tabela 103: Resumo das possíveis causas de variação de uma propriedade segundo o modelo de usina proposto na Figura 118.	354
Tabela 104: Aditivos utilizados durante a Fase 1.	407
Tabela 105: Resumo dos ensaios realizados utilizando-se aditivos.	409
Tabela 106: Resultados de caracterização das argamassas com areia reciclada de Socorro/SP utilizando-se cinco aditivos IAR.	411
Tabela 107: Custo por kg e por m ³ das argamassas produzidas com cimento CP II F, a amostra S3 de areia reciclada coletada em Socorro/SP e os aditivos IAR encontrados no mercado, considerando apenas o custo dos materiais.	414
Tabela 108: Resultados de contagem de fissuras dos revestimentos de argamassa com a amostra S4 de Socorro/SP, com e sem a utilização de IAR.	416
Tabela 109: Revestimentos de argamassa com cimento CPIII 40 RS, areia não lavada e aditivos, produzidos na usina de Socorro.	418



CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DA PRODUÇÃO E CONTROLE DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM AREIA RECICLADA LAVADA DE RESÍDUOS CLASSE A DA CONSTRUÇÃO CIVIL

RESUMO

O elevado volume de resíduos da construção civil (RCC) classe A gerado tem incentivado a instalação de usinas de reciclagem em diversas cidades. Mas o processo de reciclagem das usinas nacionais é primário, e os agregados produzidos têm sido usados apenas em obras de pavimentação e aterros, limitando a expansão da reciclagem, o uso pelo mercado e a sua valorização comercial. É necessária então a evolução dos processos de reciclagem de RCC para novas aplicações. Considerando a tradição do uso de argamassas pela construção civil brasileira, o desenvolvimento da produção dessas misturas a partir de areia reciclada, com garantia de qualidade, pode ser uma alternativa viável. Assim, esta tese teve por objetivo desenvolver uma metodologia de produção de argamassas para revestimento de paredes e tetos com areia reciclada em usinas de reciclagem, com garantia de homogeneidade e bom desempenho, como prosseguimento à pesquisa de MIRANDA (2000). Foi criado um programa experimental com cinco fases que avaliou a variabilidade da areia reciclada e das argamassas produzidas na usina de Socorro/SP e testou as seguintes variáveis: controle granulométrico, controle da natureza e do teor de finos < 75 µm por lavagem, classificação visual do RCC e formação de pilhas de homogeneização. As proporções de mistura das argamassas foram definidas a partir de MIRANDA (2000) e de parâmetros de dosagem propostos em SELMO (1989), e fixadas em 1:8 (cimento, areia reciclada não lavada) ou 1:1:8 (cimento, cal, areia reciclada lavada). Os agregados e argamassas foram caracterizados por métodos usuais. Também foram produzidos revestimentos em substratos de alvenarias de blocos de concreto e de tijolos cerâmicos maciços, e verificado o desempenho quanto ao surgimento de fissuras e aderência à tração. Para a análise dos resultados, foram utilizadas ferramentas de controle estatístico de processo. Como conclusões, constatou-se que o controle granulométrico da areia reciclada e a classificação visual de RCC não foram suficientes para reduzir a variabilidade das argamassas. Mas, quando o controle de finos < 75 µm foi aplicado através da remoção das partículas < 0,15 mm por lavagem e sua substituição por cal, segundo proposta de MIRANDA (2000), observou-se uma diminuição significativa da variação das propriedades das argamassas, e essa foi ainda mais reduzida com a utilização da técnica de formação de pilhas de homogeneização, em equipamento piloto projetado por este autor. Entretanto, também isso não foi suficiente para se obter um processo sob controle estatístico, em padrões industriais usuais (3σ). Não obstante, e dado não haver documento nacional ou internacional com os dados e experiência de campo aqui reunida, a tese é finalizada com uma proposta completa de produção de argamassas em usinas de reciclagem, incluindo o processo de reciclagem, o procedimento de formação de lotes para o controle de qualidade da areia reciclada lavada e das argamassas, por métodos simplificados e selecionados a partir das correlações observadas neste trabalho entre as propriedades dos agregados e das argamassas.



CONTRIBUTION TOWARDS THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION AND CONTROL OF MORTAR FOR RENDERING WITH WASHED RECYCLED SAND FROM CLASS A CIVIL CONSTRUCTION WASTE

ABSTRACT

Although the vast volume of construction and demolition waste has stimulated its recycling, the process in national recycling plants is primary and the recycled aggregates have been employed only in pavement works and earthworks, thus limiting the expansion of recycling, its use by the market and its commercial valorization. Hence it is necessary to develop recycling processes of CDW for new applications. Considering the tradition of the use of mortars in Brazilian civil construction, developing the production of these mixtures from recycled sand, with guaranteed quality, may be a viable alternative. Therefore this thesis aims at developing a mortar production methodology for wall and ceiling rendering with recycled sand from recycling plants, guaranteeing homogeneity and good performance, continuing the research of MIRANDA (2000). A five-step experimental program was designed in order to evaluate the variability in recycled sand and mortars produced in a plant in Socorro/SP and to test the following variables: control of grain size distribution, control of the nature and content of material finer than $< 75 \mu\text{m}$ by washing, visual classification of CDW and the formation of homogenization piles. The mix proportions of mortars were defined according to MIRANDA (2000) and to dosage parameters proposed in SELMO (1989) and were set at 1:8 (cement, unwashed recycled sand) or 1:1:8 (cement, lime, washed recycled sand) in mass. Aggregates and mortars were characterized by usual methods. Statistical process control tools were employed in the analysis of results. Renderings on concrete block and ceramic brick substrates were also produced, and their performance was verified regarding fissures and bond tensile strength. As a conclusion it was verified that the control of grain size distribution of recycled sand and visual classification of CDW were not sufficient to reduce the variability of mortars. Nevertheless, the control of the content of fines $< 75 \mu\text{m}$ through washing in a 0.15 mm sieve or through the use of spiral classifier, with the replacement of fines with lime, as proposed by MIRANDA (2000), provided a significant reduction in the variation of mortar properties, which was increasingly reduced with the use of the technique of homogenization pile, in pilot equipment designed by the author. However, this was also insufficient to obtain a process under statistical control by usual industrial standards (3σ). In spite of this, and given the fact that there is no national or international document with the data and field experiment collected here, the thesis is concluded with a complete proposal of mortar production in recycling plants, including the recycling process, the procedure to form lots for quality control of the washed recycled sand and the mortars, by means of simplified methods selected on the basis of the correlations observed in this work between aggregate and mortar properties.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância e justificativa

A construção civil é o setor responsável pela parcela predominante da massa total dos resíduos sólidos urbanos (SINDUSCON-SP, 2005) e pelo consumo do maior volume de recursos naturais do planeta, em estimativas que variam entre 15% e 50% das jazidas minerais exploradas, sendo que seus produtos consomem grande energia no processo fabril (JOHN, 1999). Portanto, torna-se extremamente necessário reciclar os resíduos gerados, pelo problema ambiental que causam desde a sua extração até a deposição como entulho.

Apesar disso, a reciclagem de resíduos de construção civil (RCC) como material de construção encontra-se atrasada no Brasil, especialmente, se comparada à dos países europeus.

O estudo do emprego de RCC iniciou no Brasil pelo trabalho de PINTO (1986), e vem aumentando paulatinamente por trabalhos como os de LEVY (1997), ZORDAN (1997), ANGULO (2000), MIRANDA (2000), CARNEIRO *et al.* (2001), LEVY (2001), AGUIAR (2004), DIAS (2004), CARRIJO (2005) e PIETRA (2005), mostrando a preocupação e o empenho da equipe de pesquisadores do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP e do país neste tema.

No tocante ao estudo das argamassas de revestimento de paredes e tetos com areia reciclada de RCC, acredita-se que o trabalho de LEVY (1997) seja um dos primeiros que abordou esta aplicação, depois de PINTO (1986). LEVY (1997) realizou diversos experimentos, mas não contemplou propriedades importantes no desempenho dos revestimentos, como controle de fissuração, resistência à abrasão e permeabilidade à água.

Em seqüência, pode-se citar o trabalho de mestrado deste pesquisador (MIRANDA, 2000), financiado pela FAPESP¹, que, trabalhando com composições

¹ Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Projeto nº 98/09982-9

de RCC selecionados produzidos em laboratório e composto de bloco cerâmico, argamassa mista comum e blocos de concreto, avaliou o desempenho de nove diferentes revestimentos feitos com areia reciclada quanto à fissuração, aderência ao substrato, absorção capilar e choque térmico, contribuindo com os estudos de dosagem e desempenho de argamassas com areia reciclada de RCC.

Porém, nenhum desses trabalhos focalizou a produção de argamassas com a utilização de areia reciclada de usinas de reciclagem, que é uma das alternativas mais oportunas para racionalizar a sua fabricação, principalmente visando o uso da fração cerâmica ou mista de RCC já que, na maioria das cidades onde já existe usina de reciclagem instalada, esta é a fração predominante de RCC e de maior dificuldade para se encontrar mercado consumidor.

No exterior, não foi encontrada qualquer referência bibliográfica com este enfoque.

Mas, para esta aplicação, um outro problema surge, pois a presença de materiais de diversas naturezas em RCC, a variação de sua composição ao longo do tempo e a possível presença de contaminantes podem originar argamassas com comportamentos bem diferentes. Esta heterogeneidade da argamassa e a falta de normas ou parâmetros de controle para o produto podem ser vistas pelas administrações públicas e empresas privadas como uma inviabilidade técnica e, portanto, como um entrave para maiores investimentos ou consumo deste material pelo setor.

No caso específico de argamassas de revestimento, um elevado grau de variabilidade é fator limitante para este tipo de emprego, pois pode comprometer o desempenho e a durabilidade dos revestimentos, sendo que apenas argamassas de assentamento são factíveis de produção pelo processo convencional e primário de reciclagem que é adotado nas usinas brasileiras e em muitas no estrangeiro.

Aliás, esta preocupação com a heterogeneidade da areia reciclada foi comprovada em campo durante o trabalho de mestrado deste pesquisador, através de reuniões e entrevistas informais com representantes de construtoras da cidade de São Paulo.

Caso estes problemas sejam resolvidos e considerando a tradição do uso de argamassas em obras civis brasileiras, será possível aumentar a porcentagem de RCC reciclado no Brasil, uma vez que aumentará sua alternativa de aplicação e, portanto, seu consumo.

Assim, esta pesquisa é de grande importância, pois, através do estudo e adequação de métodos para a produção de areia reciclada de RCC, será factível a sua aplicação em revestimentos de paredes e tetos. Isto retornará resultados práticos e viáveis para o desenvolvimento técnico da reciclagem, com ênfase na homogeneidade das propriedades de argamassas produzidas em usinas de reciclagem, sendo este um requisito fundamental para que se possa ampliar a reciclagem de RCC, bem como a sua utilização na construção civil, com garantia de qualidade e durabilidade.

1.2 Objetivos da tese

O objetivo desta tese é contribuir para o desenvolvimento de um processo de produção e controle de areia reciclada para argamassas de revestimento, ou de argamassas pré-misturadas, em usinas de reciclagem, de forma que elas mantenham, ao longo do tempo, constância de suas propriedades e de seu desempenho para substratos comuns de paredes e tetos e para condições normais de exposição climática.

Considerando o estágio primário de desenvolvimento da tecnologia de reciclagem de RCC de origem mineral para argamassas, no país, esta tese irá apresentar de forma original:

- um fluxo de produção de areia reciclada lavada para argamassas de revestimento, testado através de equipamentos pilotos desenvolvidos pelo autor e estabelecido com base nos fundamentos de dosagem e desempenho de argamassas com areia reciclado estudados por MIRANDA (2000), evoluídos desde SELMO (1989);
- um fluxo de controle do processo de produção e da qualidade dos agregados e argamassas produzidas, envolvendo:

- a) um método de formação de lotes, tamanho de amostra e método de coleta;
- b) as propriedades críticas que devem ser controladas no agregado e na argamassa e seus limites de especificação;
- c) as orientações para controle de aceitação e rejeição dos lotes.

1.3 Conteúdo e estrutura da tese

Esta tese está estruturada em sete capítulos, da seguinte forma:

- no Capítulo I, de Introdução, são apresentadas a importância, as justificativas e o objetivo da tese;
- nos Capítulos II e III estão apresentadas as revisões bibliográficas sobre reciclagem de RCC e argamassas, respectivamente, importantes para o desenvolvimento da pesquisa;
- o Capítulo IV apresenta um resumo das principais técnicas estatísticas de amostragem de materiais e de controle de processos, fundamentais na definição do planejamento experimental e na análise dos resultados;
- o Capítulo V descreve o programa experimental realizado;
- o Capítulo VI contém os resultados experimentais obtidos e sua análise;
- no Capítulo VII estão as conclusões da pesquisa;
- nas Referências Bibliográficas estão descritos os trabalhos consultados e citados nesta tese;
- nos Anexos estão os resultados de caracterização de diversas propriedades dos agregados, argamassas e aglomerantes, um estudo exploratório inicial da eficiência do uso de aditivos na melhoria das propriedades das argamassas e revestimentos com areia reciclada, tabelas para aplicação das normas de controle de qualidade e uma

orientação para a montagem de um laboratório de controle de agregados e argamassas com areia reciclada de RCC.

2 RECICLAGEM DE RESÍDUOS CLASSE A DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1 Definição e classificação dos resíduos da construção civil

A Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 5 de julho de 2002, define como resíduo de construção civil (RCC) os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha.

Esta resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil e os classifica da seguinte forma:

- Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, como componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos, etc.), argamassa e concreto; de construção de demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros-de-obras;
- Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

- Classe D – são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

A Resolução CONAMA nº 348 altera a Resolução CONAMA nº 307, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos, ficando da seguinte forma a definição da classe D: “são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde”.

A inclusão do amianto na classe D tem provocado discussões no meio técnico, uma vez que apenas o pó do amianto é considerado nocivo à saúde.

Mas, pela NBR 10004/04, o RCC foi designado por uma classificação diferente, mas não conflitante, da proposta pelo CONAMA, que é o seguinte:

- Classe I: são os que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, considerados resíduos perigosos;
- Classe II: são os resíduos não perigosos, divididos nas subclasses IIA (não inertes) e IIB (inertes). Os resíduos classificados como Classe A pelo CONAMA seriam classificados como IIB pela NBR 10004/04.

Este trabalho optou pela terminologia dos resíduos da construção civil segundo a classificação do CONAMA, pois entende que as siglas adotadas pelo CONAMA são mais coerentes com as exigências de triagem e segregação com que os resíduos de origem mineral precisam ser tratados para que possam ser progressivamente reciclados no Brasil. Assim, s resíduos classe A podem ter uma melhor conotação de valor para os geradores ou consumidores do que resíduos de classe IIB, e por isto esta tese opta e defende a revisão dos termos da ABNT, na NBR 10004/04.

Apesar de serem considerados resíduos de baixa periculosidade, nos dias atuais, pode ser considerado grave o problema de geração de RCC classe A no país,

devido ao grande volume que se deposita de forma caótica pelas cidades em geral, como mostrado no item 2.2 a seguir.

2.2 Importância da reciclagem

O volume de RCC gerado em todo o mundo é alarmante. Por ano, são produzidos na Alemanha cerca de 33 milhões de toneladas (RUCH *et al.*, 1997b). Na Inglaterra, chega a 70 milhões de toneladas por ano (FREEMAN; HARDER, 1997) e, na França, de 20 a 25 milhões de toneladas (BOILEAU, 1997). No oeste da Europa, a quantidade é cerca de 0,7 a 1,0 tonelada por habitante, quase 2 vezes a massa do resíduo sólido municipal (SIMONS; HENDERIECKX, 1994). No Canadá, o volume de RCC representa 35% do total de resíduos produzidos, o que equivale a 11 milhões de toneladas (ACC, 2001).

Com todo esse volume, o RCC foi classificado como resíduo prioritário pelo Community European Committee (CEC) (RUCH *et al.*, 1997a) e sua reciclagem tem sido estudada por vários países desenvolvidos, como Holanda, Bélgica, França, Japão e Inglaterra. Como exemplo, na Alemanha se recicla cerca de 60% do RCC gerado; na Holanda, cerca de 95% (PUT, 2001). Em média, nos países da comunidade européia, cerca de 60% do RCC gerado (aproximadamente 180 milhões de toneladas) está sendo reciclado correntemente (MOMBER, 2002).

No Brasil, PINTO (1999) mostrou que é gerada, em média, 0,52 tonelada de RCC por habitante e por ano ou 150 kg por m² construído, representando de 54% a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos. A Tabela 1 apresenta a estimativa da massa de RCC gerada em algumas cidades paulistas.

Como regra geral, quanto maior a cidade, mais grave é a questão dos resíduos de construção (JOHN; AGOPYAN, 2003).

Todo este volume de RCC está tomando os aterros urbanos regulares e as reservas de matéria-prima cada vez mais esgotados. Além disso, devido à distância desses aterros, muitas vezes os resíduos da construção civil são jogados em botasforas clandestinas, tornando-se uma fonte geradora de problemas e de constantes prejuízos para as cidades como, por exemplo, agravando as enchentes urbanas, poluição visual e proliferação de doenças como leptospirose.

Tabela 1: Massa de RCC gerada em algumas cidades do estado de São Paulo (SINDUSCON-SP, 2005).

Municípios – SP	Fonte	Geração diária (t.)	Participação em relação aos resíduos sólidos urbanos (%)
São Paulo	I&T 2003	17.240	55
Guarulhos	I&T 2001	1.308	50
Diadema	I&T 2001	458	57
Campinas	PMC 1996	1.800	64
Piracicaba	I&T 2001	620	67
São José dos Campos	I&T 1995	733	67
Ribeirão Preto	I&T 1995	1.043	70
Jundiaí	I&T 1997	712	62
São José do Rio Preto	I&T 1997	687	58
Santo André	I&T 1997	1.013	54

Além de causarem a degradação ambiental, resíduos da construção civil aumentam expressivamente os custos da administração municipal. São Paulo, por exemplo, gasta R\$ 4,5 milhões por mês na remoção de despejos clandestinos (BRITO, 1999). Mesmo em capitais menores, como da Prefeitura de São Luís/MA, dados apresentados durante a audiência pública de 16/09/2005 contabilizam gastos de R\$300.000,00/mês com remoção de resíduos e, portanto, a situação não é diferente para esses municípios.

Logo, é muito importante que sejam desenvolvidos novos materiais e técnicas construtivas para materiais reciclados que diminuam o volume de RCC gerado por obras novas, reformas e demolições, o que só pode ser combatido através da educação social para a reciclagem, fiscalização, estruturação de políticas públicas e de pesquisas do setor acadêmico engajados no tema.

2.3 Panorama sobre a reciclagem de RCC na Europa

A Europa é o continente onde são encontrados os países mais desenvolvidos na área de reciclagem de RCC. Entre eles, a Holanda, a Bélgica e a Alemanha podem ser considerados os mais avançados, seguidos da Inglaterra, França, Itália e Espanha.

2.3.1 Holanda

A Holanda é hoje um dos países mais desenvolvidos do mundo no processo de reciclagem de RCC. Cerca de 95% de RCC produzidos são reciclados, o que corresponde a 16,5 milhões de toneladas de agregados reciclados somente no ano 2000, sendo mais de uma tonelada por habitante por ano (PUT, 2001).

Todo este volume reciclado só foi possível graças ao fechamento perfeito da cadeia que envolve a reciclagem: gerador, transportador, setores públicos e privados.

Obtidos esses vínculos, tornou-se mais fácil tomar as medidas necessárias para desenvolver a reciclagem naquele país, como a criação de programas de pesquisa para uso de agregados em pavimentação e em concretos, o incentivo ao surgimento de empresas particulares especializadas em reciclagem, com critérios de aceitação, de melhoramento contínuo e de certificação de qualidade dos agregados baseado em requisitos e critérios técnicos e ambientais.

As principais ações da legislação, quanto ao gerenciamento da cadeia produtora de resíduos, foram: proibição da disposição de RCC não segregados, taxas ambientais elevadas para resíduos e RCC não segregados, que hoje atingem €150/t (aproximadamente R\$ 348,00/t), proibição do uso de amianto nos materiais de construção, obrigação da demolição seletiva, criação de legislação para britadores estacionários e legalização do uso de britadores móveis (PUT, 2001).

A utilização de britadores móveis também foi responsável pelo aumento da reciclagem, sendo responsável pela reciclagem de 4,5 milhões de toneladas do total de 16,5 milhões reciclados em 2000. Esta alternativa funciona como uma usina de reciclagem móvel e é considerada fundamental em locais onde não existe espaço para britadores estacionários e armazenamento de materiais, onde o custo de transporte é elevado, onde existem muitos engarrafamentos de trânsito e quando se deseja ter uma influência favorável para a demolição seletiva e para o meio ambiente (PUT, 2001).

A Figura 1 abaixo apresenta uma usina de reciclagem de RCC em Zaandam, Holanda. Esta usina, pertencente à empresa Buko², possui uma estrutura para elevada produção de material reciclado, cujo destino é todo para base e sub-base de pavimentos.



Figura 1: Usina de reciclagem Buko, em Zaandam, Holanda. a) Vista externa da usina. b e c) Equipamentos utilizados para reciclagem do RCC. d) Variabilidade da natureza do RCC (fotos do autor, 2001).

² Buko Transport & Recycling. <http://www.buko.com.br>.

2.3.2 Itália

Na Itália, a usina eleita como modelo para tratamento de RCC (Figura 2 e Figura 3) é chamada ROSE (Recupero Omogeneizzato Scarti Edilizia – Recuperação Homôgenea de Resíduo de Demolição) e foi construída por Pascale e Castellarano. As principais razões para a escolha desta usina foram (BRESSI, 2003):

- o reconhecimento público que esta usina tem obtido através da indústria ambiental, como uma solução simples mas efetiva;
- o pequeno impacto sobre a saúde dos trabalhadores e sobre o ambiente, com pouca produção de pó, custos reduzidos, economia energética;
- o controle de qualidade dos materiais produzidos;
- ausência no mercado da Itália de outras usinas tão confiáveis.

Nesta usina, o primeiro estágio do processo diz respeito ao controle de qualidade do RCC que chega na usina para verificar sua admissão. Este controle é feito por um operador, colocado na entrada da usina, através de uma câmera colorida conectada a um monitor de alta definição. Isso torna possível checar superficialmente a natureza dos resíduos trazidos pelo caminhão antes de sua pesagem e descarga (BRESSI, 2003).

Após esse controle, os resíduos são estocados provisoriamente em uma área que prevê sua separação por natureza (BRESSI, 2003). Então, os resíduos são transportados para o britador por uma pá carregadeira. Nesta fase, o operador escolhe o material antes de introduzi-lo no alimentador de forma a obter uma carga uniformemente distribuída entre seus componentes. Esta operação é necessária para obter um produto final com boas características de homogeneidade.

Antes do material inerte passar por tratamento, ele é mantido constantemente sob controle qualitativo por meio de uma segunda câmera posicionada na saída do alimentador.

Durante essa fase, o operador pode bloquear a alimentação e submeter a carga a uma checagem visual ou removê-la para uma análise completa de sua composição de forma a verificar a ausência de resíduos tóxicos ou perigosos.

O material é então peneirado em uma peneira vibratória e transportado para o britador. O britador foi projetado de tal maneira que reduza o tamanho dos resíduos e separe perfeitamente os componentes ferrosos do concreto (mesmo aquelas com a aderência mais elevada), sem danificar os mecanismos do britador.

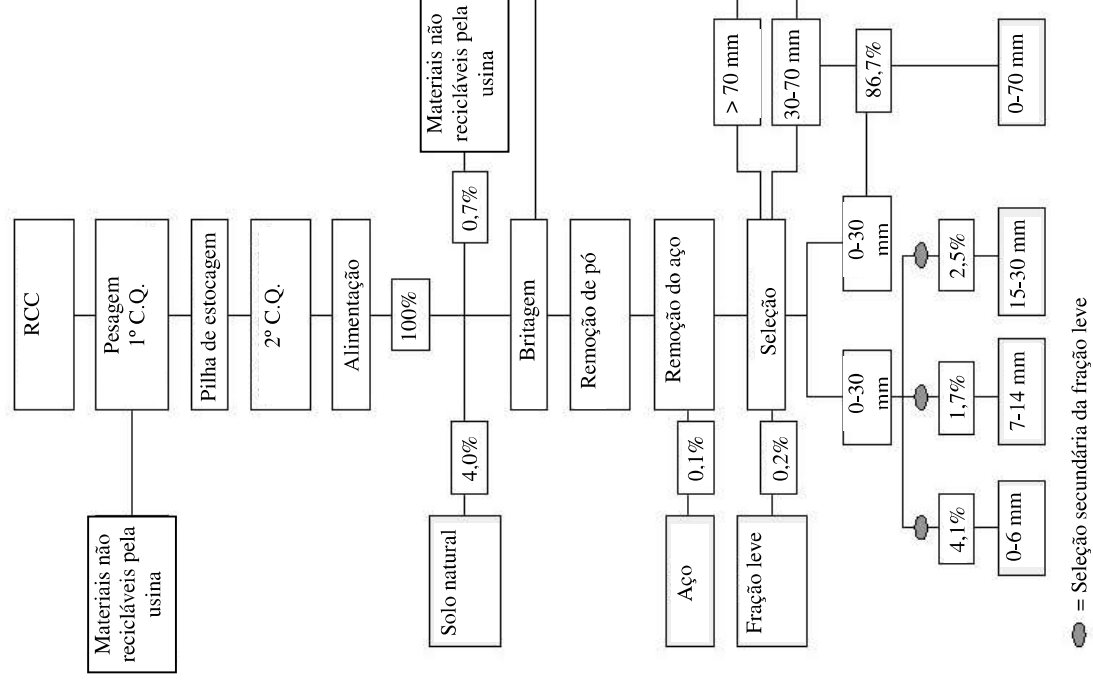


Figura 2: Usina de reciclagem modelo na Itália, de sigla ROSE (BRESSI, 2003).

Os materiais britados são transportados para um separador magnético que separa os metais do restante dos resíduos e os estoca em um contêiner metálico.

Após esta operação, o material é movido por um outro transportador de correia, que possui um segundo separador magnético de emergência, para uma peneira vibratória de dois “decks” que o separa em dimensões padrão (0-30, 0-70, 0-140, 30-70, 70-140 e 30-140 mm) com possível reciclagem das frações maiores que 30 mm.

Neste mesmo estágio, as frações mais leves de RCC (papel, papelão, plástico, tinta, etc.) são separadas pela diferença de densidade e enviadas para deposição.

No caso de se fazer usos especiais dos agregados reciclados (como para compósitos e concretos), pode ser necessário rebitar e separar os resíduos de fração 0-30 mm em três faixas: 0-6 mm, 6-18 mm e 18-30 mm. Neste caso é possível fazer o material passar por uma estação de seleção secundária antes de sua estocagem final.

Usando um outro transportador de correia, os materiais são então enviados para um túnel de armazenamento e homogeneização. Os montes de materiais depositados no túnel devem ter uma altura máxima de 12 metros.

O túnel é provido de 4 alimentadores vibratórios. O material resultante é representativo de todo o tamanho de grãos e da variedade qualitativa estocada no túnel.

Um transportador de correia de extração é ligado a dois silos metálicos de capacidade de 30 m³ cada. Esse dois silos possibilitam a saída de material sem a necessidade de outra pá mecânica.

Todas as etapas que produzem poeira foram estudadas de forma a prover meios de remoção das partículas presentes no ar, com um resultado final excelente.

A eficiência desta usina é muito alta. Considerando um fluxo simples de saída de cada 1000 kg de resíduo de demolição que entram, a média aproximada de produtos for assim estimada por BRESSI (2003):

- 0,2 kg de material inadequado, a ser depositado em aterro sanitário;
- 1 kg de fração leve (papel, plástico, madeira, etc) a ser enviado para uma usina de tratamento de resíduo sólido;
- 3 kg de material ferroso;

- 995,8 kg de material processado de resíduos de origem mineral (incluindo produtos para usos especiais);

Para produzir 50 m³/h de agregado reciclado, são gastos aproximadamente 90 kW ($\pm 10\%$).

Uma das principais características da tecnologia empregada pelo modelo de usina ROSE é que ela pode ser totalmente controlada por três pessoas, onde um opera a pesagem.

As câmeras de controle e a automação dos movimentos dos materiais tornam possível esta redução de trabalho. O sistema de controle de toda a usina é completamente computadorizado e permite, através do uso de um simples computador:

- o armazenamento de imagens enviadas pelas câmeras;
- a otimização do procedimento de manutenção, graças ao controle remoto das máquinas mecânicas;
- a regulagem de alimentação do material, controlando o funcionamento do britador. Em caso de emergência, um conjunto de alarmes (que pode eventualmente ser enviado por modem automaticamente para uma estação remota) pode ajudar e facilitar o controle do operador.

O custo energético de operação da usina está em torno de $3,5 \times 10^6$ Liras/mês (1750 Euros/mês). Como a produção de metais é de aproximadamente 1500 kg/dia, a venda deste material seria o bastante para cobrir os custos de energia da usina.

Assim, pode-se resumir abaixo as principais características da usina R.O.S.E utilizada na Itália:

- consumo de aproximadamente 100 kW de energia para uma capacidade de produção de 50 m³/h;
- controle de entrada de materiais por câmera;
- sistema de pré-seleção com desvio (by-pass) para os materiais mais finos;
- um sistema para captação de poeira;

- uma peneira para remoção da fração mais leve sem consumo de energia;
- produção de seis possíveis combinações de tamanho de grãos, com capacidade de 50 m³/h;
- um sistema de homogeneização do material produzido;
- um sistema de carregamento automático de caminhões;
- necessidade de somente 3 pessoas para operá-la, sendo que uma delas lida com o trabalho fiscal necessário;
- a característica do material produzido possibilita seu uso como substituto parcial da mistura estabilizada para construção de estradas;
- o suprimento de material reciclado é contínuo e homogêneo, evitando alterações de projeto durante os trabalhos.

Em relação à qualidade dos produtos produzidos, os materiais inertes produzidos por esta usina passam por alguns testes de qualidade. Entretanto, é considerado que os testes laboratoriais correntes para materiais naturais não podem ser usados em materiais alternativos, uma vez que o comportamento destes materiais é variável.

Além disso, como os resíduos da construção civil têm diferentes naturezas, resistência e massa específica, considera-se que estes ensaios não seriam representativos por serem realizados com pequenas quantidades, apesar de serem usadas técnicas de homogeneização e seleção. Isto poderia ser corrigido realizando-se testes mais numerosos e sistemáticos.

Os testes realizados podem ser divididos em duas categorias principais. A primeira engloba ensaios de aceitação e, a segunda, de qualificação.

Os ensaios de aceitação definem se o material pode ser reciclado e/ou reusado ou se ele deve ser rejeitado, sendo eles distribuição granulométrica, índice de forma e achatamento e presença de contaminação por matéria orgânica.

Os ensaios de qualificação estabelecem a qualidade do material e a melhor forma de utilizá-los, sendo eles a determinação da umidade ótima, avaliação do inchamento e comportamento em relação à abrasão e sensibilidade ao gelo.

No caso de uso em pavimentação, em geral, os melhores resultados de compactação são obtidos quando a umidade está entre 10,8% e 12,1%, para os resíduos de construção caracterizados na Itália. Na usina modelo ROSE, os custos de reciclagem são de, aproximadamente, 4 Liras/kg (ou 0,002 Euros/kg) e os custos de transporte para aterros variam entre 3 e 6 Liras/kg (0,0015 a 0,003 Euros/kg). Assim, a reciclagem de RCC só dependerá do preço do material natural, sendo conveniente manter o preço do agregado reciclado entre 80% e 90% do agregado natural.

Pode-se notar pelos ensaios descritos que os resíduos de construção civil na Itália são usados, principalmente, em construção de estradas, não tendo sido especificados os controles relativos a usos mais nobres. De acordo com PUT (2001), a Itália recicla cerca de 10% do RCC produzido.

Esta conclusão implícita no texto de BRESSI (2003) também foi confirmada em visita pela orientadora deste trabalho a uma grande empresa especializada em reciclagem de Torino, a Lacave, dotada de uma excelente usina com padrão de controle bastante automatizado, como ilustra a Figura 3.



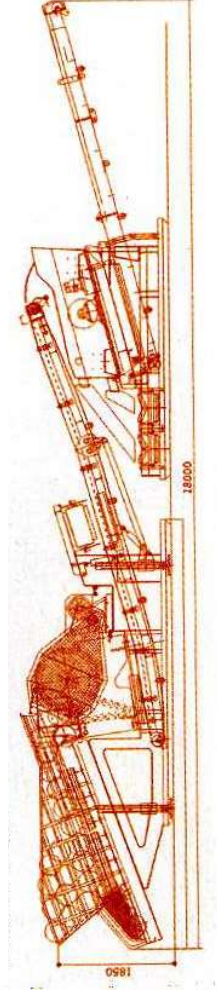
Figura 3: Exemplo de usina de reciclagem fixa, modelo ROSE, de propriedade da empresa LaCave, em Torino, Itália.

Em muitos casos também, são utilizadas usinas móveis de reciclagem de RCC, como pode ser visto na Figura 4, onde se observa a presença de um rompedor para

quebra primária de pedaços grandes de RCC, muito útil para aumento de produtividade quando se tem RCC de natureza predominante em concreto.



Fase de produção



Fase de transporte

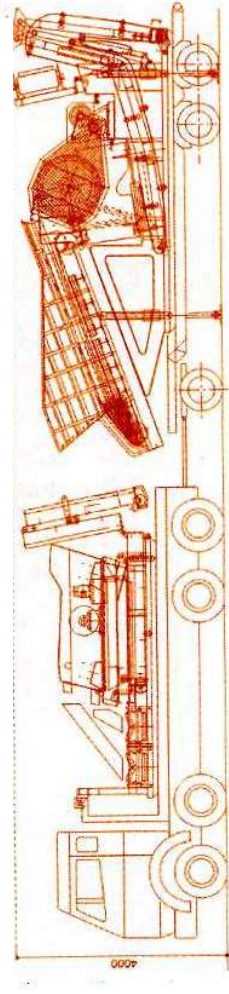


Figura 4: Exemplo de usina móvel de reciclagem de RCC utilizada na Itália.

No item 2.4.10 é feito um comparativo entre os dados técnicos desta usina e da usina brasileira Urbem.

2.3.3 Alemanha

De acordo com os dados levantados pela orientadora desta tese, em sua visita à Alemanha, Hamburgo é uma cidade com controle ambiental bastante rigoroso e moderno, que tem plano de gestão de resíduos progressivo e implementado desde 1997, a ponto de ter conseguido varrer do seu território os problemas mais sérios de deposição irregular ou clandestina.

Todavia, as autoridades reconhecem que as indústrias locais podem estar deslocando o passivo ambiental para os países vizinhos na Europa Ocidental e com controle e fiscalização menos rigorosos.

De forma similar ao que acontece no Brasil, os RCC em Hamburgo³ são os mais volumosos, 5 milhões de t/ano em 2003, enquanto os resíduos domésticos não chegam a 1,5 milhões de t/ano.

Hamburgo possui cerca de 50 plantas de triagem privadas e 15 centros estatais de reciclagem. Entre os RCC, os solos são os de maior volume (3,5 milhões de t/ano) seguido pelos resíduos de concreto e alvenarias (750 mil t/ano), resíduos mistos e, por último, os asfaltos (cerca de 300 mil t/ano).

Os custos para produção de agregados reciclados de qualidade controlada nas usinas alemãs não são baixos, o preço de agregados naturais não é elevado, as exigências para a durabilidade de materiais de construção no clima europeu precisam ser rigorosas e toda essa conjuntura inibe o emprego de agregados reciclados em concretos estruturais e em outros usos não estruturais, como argamassas e componentes de alvenaria, e os processos de reconstrução pós-guerra com emprego desses materiais não são hoje aceitos pela evolução da qualidade ocorrida no setor da construção civil europeia.

Quanto ao desenvolvimento de pesquisas, apenas pesquisas de ponta, na Bauhaus - Universität Weimar, na Alemanha, estão hoje priorizando a reciclagem da fração de cerâmica vermelha de alvenarias e por processos via úmida, na linha do quem vem sendo estudado nesta tese.

³ Hamburgo tem população de 1.725.000 habitantes em território de 755 km².

As metas futuras da gestão de resíduos em Hamburgo dizem respeito à evolução normativa, manter taxas de gestão em valores constantes, aumentar a capacidade de incineração e evoluir na gestão de resíduos eletrônicos.

Esta orientadora teve a oportunidade de conhecer o processo de reciclagem de 2 usinas privadas de reciclagem de RCC neste país, como resumido nos itens a seguir.

2.3.3.1 A usina de reciclagem da Buhck GmbH & Co. KG

Buhck GmbH & Co. KG (www.buhck.de) é um grupo empresarial com larga experiência e espectro de ação na gestão de resíduos na Alemanha. A usina visitada (é da empresa afiliada ao grupo e conhecida como “HME – Hamburger Müllentsorgung Rohstoffwertungs GmbH” (www.hme-hamburg.de).

A HME recebe cerca de 100 mil t/ano de RCC, sendo 40 mil t/ano a fração mineral reciclada, 53 mil t/ano reciclada nas outras frações e apenas 7 mil t/ano vai para incineração.

Os preços praticados para deposição de resíduos mistos oscilam de 75 a 100 Euros/t, sendo o preço oficial de 32 Euros/m³. Os preços para deposição de RCC mineral triado é muito menor, 7 Euros/m³ para solo e 13 Euros/m³ para outros resíduos minerais.

Esta empresa testemunhou que os construtores não são os mais adeptos à prática de reciclagem com triagem em canteiro de obras, por acharem que isto pode comprometer a produtividade e aumentar custos. Assim, a triagem na planta da HME é uma prática comum e cerca de 300 m³/dia são separados por 6 pessoas.

O principal ramo de venda dos agregados minerais reciclados é para estradas e ruas e não há perspectiva de comercialização de frações recicladas para outros fins mais nobres, pois os preços de agregados naturais estão em declínio, em função do grande volume que passou a ser ofertado, após a abertura das fronteiras para a Comunidade Européia e os padrões nacionais exigidos para qualidade dos materiais de construção.



(a)



(b)

Figura 5: Usina de reciclagem de RCC da empresa HME, em Hamburgo, Alemanha. (a) Entrada de resíduos de concreto, no processo de reciclagem. (b) Triagem de RCC por processo manual, semelhante ao hoje utilizado na separação de lixo doméstico.

2.3.3.2 Usina de reciclagem de RCC da Hermann Wellmann

A proprietária é uma empresa especializada apenas na reciclagem de RCC minerais e em obras de infra-estrutura, principalmente pavimentos e com atividades de reciclagem desde 1974, quando houve a proibição federal de deposição de resíduos de construção em aterros, em Hamburgo.

A usina é de grande porte e recebe cerca de 500 m³/dia de carga mineral triada. Oitenta por cento do volume reciclado é gerado por obras da própria empresa, enquanto 20% são resíduos de outros fornecedores. Há controle externo de qualidade dos resíduos por terceiros a cada 6 meses.

Apenas outras 4 plantas na Alemanha são certificadas por este tipo de controle, relativo a emprego de materiais reciclados em pavimentos. Os agregados produzidos têm sempre dimensão iniciando em 0 mm e variando até 70 mm. Os agregados são triturados em limites granulométricos mais restritos e depois re-misturados para comporem diferentes composições.

A produção de fração fina na reciclagem é um dos principais problemas na planta, e a forma de minimizar esse problema é iniciar a granulometria de todos os produtos a partir da dimensão 0 mm.

Cerca de 30 km de pavimentos são construídos por ano com a utilização de agregado reciclado pela empresa, e o seu custo por m³ é da ordem de 40% a 50% mais barato do que os agregados tradicionais.

2.4 Panorama sobre as usinas de reciclagem de RCC no Brasil

No Brasil, a primeira ênfase comercial na reciclagem de RCC foi a instalação de máquinas argamassadeiras, em canteiros de obras, para triturar os resíduos minerais na própria obra, ocorrendo entre as décadas de 80 e 90.

Esse método de produção de argamassas, apesar de aparentemente poder trazer benefícios econômicos às construtoras, apresentou problemas por falta de planejamento e de conhecimento técnico por parte dos engenheiros. Em muitos casos, os canteiros de obras não dispunham de espaço suficiente para instalação da máquina e armazenamento de RCC classe A, o que varia com o tamanho da obra. Não existia uma gestão racional do resíduo gerado, que reduzisse ao mínimo os gastos com a reciclagem e evitasse a contaminação de RCC classe A por materiais indesejáveis (aço, gesso, plástico, madeira e outros que possam inviabilizar a reciclagem).

Para agravar, eram poucos os engenheiros que tinham domínio do processo de moagem, do comportamento dos materiais reciclados e da sua influência nas propriedades das argamassas. Sendo assim, a proposta deste tipo de reciclagem era um contraponto às metas, então crescentes, de melhoria da qualidade na construção civil.

Considera-se, assim, que as grandes perspectivas para a reciclagem de RCC estejam na instalação de usinas de reciclagem, de iniciativa pública ou privada, móveis ou estacionárias, que possam produzir agregados, argamassas e pré-fabricados em volumes compatíveis à velocidade de geração de RCC pela cidade e com um nível adequado de controle tecnológico, para garantir o desempenho dos materiais e componentes produzidos, em respeito as verbas públicas e ao Código de Defesa do Consumidor.

Realmente, a reciclagem de RCC no Brasil está evoluindo por este caminho. Já foram instaladas, pelo menos, 23 usinas de reciclagem no país, distribuídas nas

cidades de Belo Horizonte (MG) (três usinas), Muriaé (MG), São José do Rio Preto (SP), Ribeirão Pires (SP), São José dos Campos (SP), Vinhedo (SP), Campinas (SP), São Paulo (SP) (duas usinas, uma pública desativada e uma particular em operação), Piracicaba (SP), Macaé (RJ), Ciriaco (RS), Ribeirão Preto (SP), Londrina (PR), Brasília (DF) (2 usinas), Jundiá (SP), Socorro (SP), São Bernardo do Campo (SP), Guarulhos (SP) e Fortaleza (CE). Destas, as 5 últimas e uma de São Paulo são privadas e as usinas públicas de São Paulo, Ciriaco (usina móvel), Ribeirão Preto, Londrina, Muriaé, Ribeirão Pires, São José dos Campos e uma de Brasília estavam inoperantes em maio de 2005.

Mas, o interesse da iniciativa privada tem crescido sobremaneira nos últimos anos, pois, de 2003 para cá, foram registradas a abertura de 4 usinas privadas. Acredita-se que alguns fatores tenham motivado este crescimento:

- a Resolução CONAMA nº 307 que obriga os geradores de RCC a tomarem uma maior responsabilidade pelos resíduos gerados;
- o projeto Entulho Bom, divulgado e apoiado pela Caixa Econômica Federal;
- o exemplo da primeira usina privada instalada em Socorro/SP, já que o projeto foi premiado em concurso promovido pela Revista Superinteressante da Editora Abril, em março de 2002, com ampla divulgação na mídia;
- o plano de negócio desenvolvido por este autor e outros pesquisadores, chamado Construção Solidária, o âmbito do projeto Casulo, que divulgou a iniciativa da reciclagem de RCC como um plano de negócio sócio-ambiental sustentável;
- muitos outros trabalhos e Workshops que se sucederam a partir de 2003, liderados em sua maioria por ação conjunta de pesquisadores da USP, através do Prof. Vanderley John com entidades privadas e de gestão municipal de resíduos em diversas cidades brasileiras.

Nos itens 2.4.1 a 2.4.6 estão descritas as características de algumas dessas usinas de reciclagem, tendo os dados em sua maior parte sido coletados em campo

por visita do autor. No item 2.9 está apresentada a descrição dos equipamentos mais comuns encontradas nestas usinas.

2.4.1 Belo Horizonte/MG

Belo Horizonte, com pouco mais de 2 milhões de habitantes, é hoje um dos melhores exemplos, no Brasil, de investimento público bem sucedido na reciclagem de RCC, pois tem uma usina que funciona de forma ininterrupta a quase 10 anos.

De acordo com os dados fornecidos pelos funcionários daquela usina, cerca de 40% dos resíduos coletados diariamente em Belo Horizonte são de RCC, o que corresponde a, aproximadamente, 1500 toneladas. Com duas usinas de reciclagem em operação, Pampulha e Estoril, em uma em fase de instalação, estão sendo reciclados ao todo cerca de 25% dos resíduos de construção civil coletados na cidade.

A usina de Pampulha (Figura 7) foi instalada em dezembro de 1996 no Bairro Bandeirante II (próximo ao Zoológico), em uma área de aproximadamente 12.500 m² e com um custo, na época, próximo de R\$ 200.000,00 (R\$ 150.000,00 do britador mais R\$ 50.000 de infraestrutura). Com um regime de trabalho máximo de 8 horas/dia, são reciclados de 240 a 400 m³ dia de RCC (equivalente a 290 a 480 t/dia), apesar do equipamento de reciclagem (britador de impacto) possuir uma capacidade nominal de 240 t/dia, e isto pode se dar pela baixa dureza e elevada porosidade de resíduos de cerâmica vermelha.

Quando um caminhão chega na usina para despejar entulho, primeiramente ele é analisado visualmente quanto à sua composição. Se for notado, antes ou após o despejo, que o resíduo possui a presença de material orgânico ou gesso, então o entulho é negado. Caso seja aceito, o caminhão passa, antes do despejo, por um chuveiro, com o objetivo de molhar o RCC e diminuir a emissão de poeira.

É prática do controle de recebimento de entulho uma classificação visual de RCC em função de sua cor e natureza mineralógica, como “cinza” com predominância de concreto e como “vermelhos” com predominância de material de cerâmica vermelha. Isto porque, nas usinas de Belo Horizonte, o RCC “cinza” é usado para produção de blocos de vedação na própria usina, enquanto o “vermelho”

é usado para obras de aterro ou sub-bases da Prefeitura (Figura 6), ou vendido para a população pela quantia simbólica de R\$2,40 o m³.



(a)

(b)

Figura 6: (a) Utilização do agregado reciclado como sub-base na rua Adelina Amaral Pongelupe, em Belo Horizonte/MG (PREFEITURA DE BH, 2003). (b) Calçamento da usina da Pampulha sendo realizado com bloquete reciclado produzido pela própria usina (2003) (fotos do autor).

Após o despejo, os resíduos de construção são espalhados com auxílio de uma pá carregadeira pelo terreno para triagem manual, que é realizada por, no mínimo, 6 funcionários. O lixo retirado pela triagem é levado para o aterro, com exceção da sucata que é vendida e das garrafas PET que são removidas por interessados.

Após triagem, os resíduos são recolhidos, armazenados e, até a sua reciclagem, são mantidos úmidos por aspersores de água ou com o uso de mangueira.



(a)

(b)

Figura 7: Usina de reciclagem de RCC, em Pampulha, Belo Horizonte/MG (2003).

(a) Triagem de RCC. (b) Britador de impacto (fotos do autor).

Após a britagem no britador de impacto, o agregado reciclado cai sobre um transportador de correia, passa pelo separador magnético, é novamente umedecido no final desta correia, para então ser armazenado até sua utilização.

É notória aqui a preocupação com o controle de poeira, uma vez que as usinas não se encontram em locais estritamente industriais, encontrando-se conjuntos habitacionais a poucos metros. Além da molhagem dos resíduos, a usina foi instalada de forma que um de seus lados fosse limitado por uma encosta e os demais cercados por árvores. Isto ajuda não só a controlar a emissão de poeira como também diminui o nível de ruído, causado principalmente pela pá carregadeira.

Os agregados reciclados “vermelhos” não passam por controle granulométrico (são vendidos ou utilizados pela própria Prefeitura da forma como saem do britador).

O agregado reciclado “cinza” é separado em frações granulométricas para possibilitar a produção de blocos de vedação (10, 15 e 20 cm de espessura), meios-fios e bloquetes. Os blocos produzidos não são vendidos, mas consumidos pela Secretaria Municipal de Limpeza Urbana - SMLU. O equipamento utilizado é de vibração mecânica, mas de compressão manual.

Alguns problemas ainda são encontrados na produção de blocos. Primeiro, o consumo de cimento parece ser elevado, com uma proporção de mistura 1: 3: 3 (cimento: areia reciclada: pedrisco reciclado). Além disso, a produção em massa dos blocos não é contínua, uma vez que o recebimento de RCC “cinza” é limitado (estimado em apenas 3 caminhões por mês na usina de Pampulha).

A usina de Estoril (Figura 8) possui as mesmas características de funcionamento da usina de Pampulha, porém ocupa uma área um pouco menor (8.000 m²). Devido a isto, cada caminhão só pode despejar entulho na usina uma vez por dia.

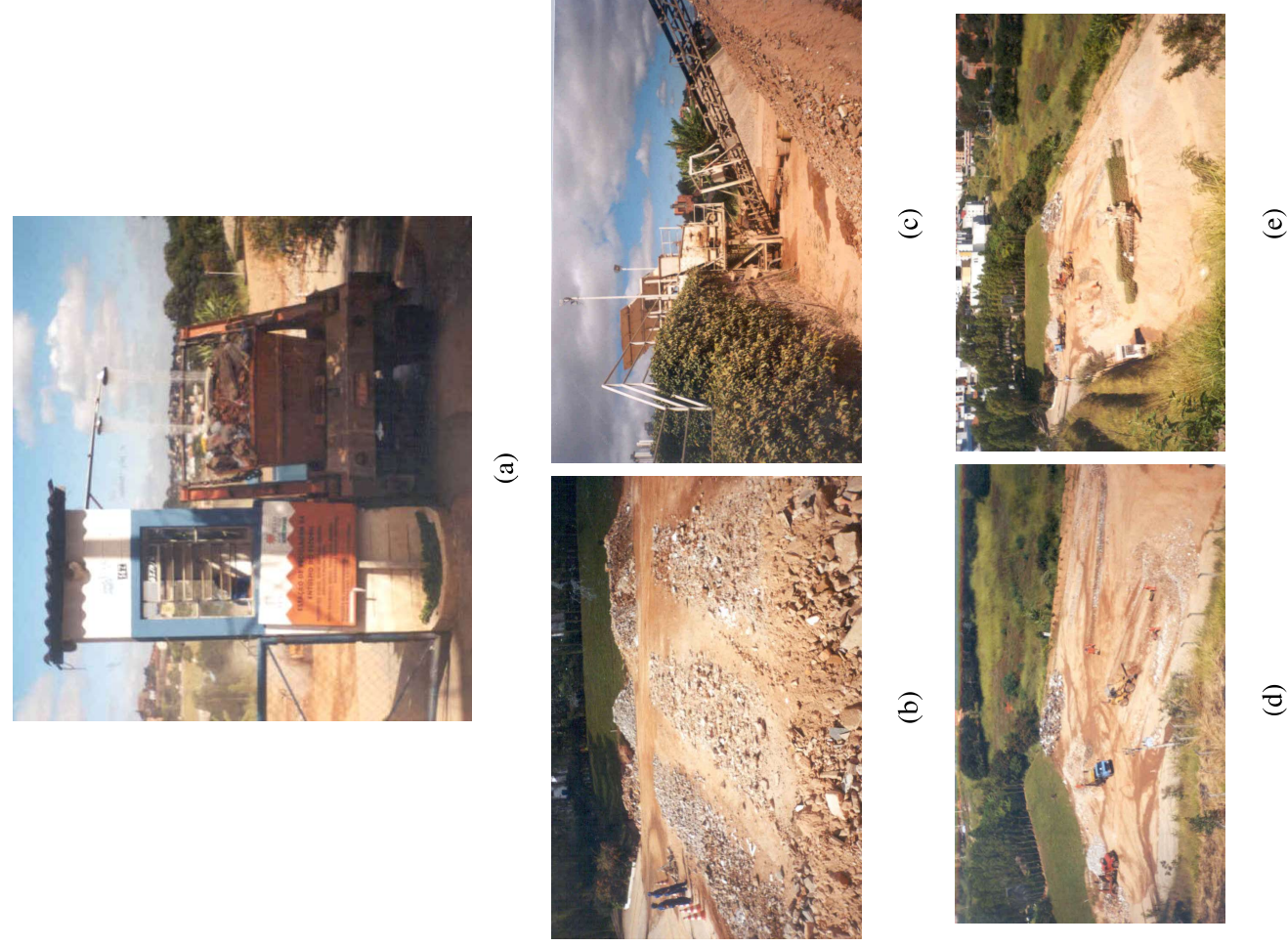


Figura 8: Usina de Estoril, BH (2003). (a) Entrada da usina, com aspersão de água em RCC. (b) leiras para triagem de RCC. (c) Vista lateral do britador de impacto. (d) e (e) Vistas aéreas da usina de Estoril (fotos do autor).

Na usina de Estoril, tinha-se como base o consumo de água de 400 m³/mês e o consumo de energia de 2704 kWh/mês, no ano de 2002. O custo aproximado por

tonelada de material britado produzido estava em R\$5,36, em junho de 2002. A Tabela 2 resume as principais características das usinas de Pampulha e Estoril.

Tabela 2: Características das usinas de Pampulha e Estoril, Belo Horizonte/MG.

Característica	Pampulha	Estoril
Área	12.500 m ²	8.000 m ²
Produção	Nominal: 240 t/dia Efetiva: de 360 a 480 t/dia	Nominal: 120 t/dia Efetiva: 300 t/dia
Custo aproximado	R\$ 200.000	-
Materiais produzidos	Agregado reciclado para sub-base e aterros, blocos, bloquetes, meio-fio	Agregado reciclado para sub-base e aterros
Triagem	Manual	Manual
Controle granulométrico	Somente para RCC “cinza”	Não
Número de funcionários	~ 15	~ 15
Separador magnético	Sim	Sim
Britador	Maqbrit, impacto, 27 cv	Maqbrit, impacto
Pá carregadeira	Case W20 – 2,4 m ³	Case W20 – 2,4 m ³
Consumo de água	-	Médio: 317 m ³ /mês Contrato: 400 m ³ /mês
Consumo de energia	-	Médio: 2704 kWh/mês
Preço de venda da brita corrida	R\$ 2,40/m ³	R\$ 2,40/m ³
Custo de produção	-	R\$ 5,36/m ³

Um aspecto interessante da gestão de RCC em Belo Horizonte é a existência de mais de 9 URPV (Unidades de Recepção de Pequenos Volumes) espalhadas pela cidade, com área aproximada de 400 m², onde carroceiros e demais pessoas com pequenos volumes de entulho podem despejar seu material livre de taxas, sem agredir o meio-ambiente (Figura 9).

Em julho de 2000, a SLU (Superintendência de Limpeza Urbana) produziu, nas suas duas usinas de reciclagem de entulho, 5.954 toneladas de material britado, para utilização na construção civil (SIGA, 2003). Em 2001, foram produzidas 138.520 toneladas de material britado (PREFEITURA DE BH, 2003).

Mas, apesar do volume reciclado, as usinas de Belo Horizonte mantêm pouco controle do material produzido, seja do agregado reciclado ou dos blocos para

vedação, e isto não é atrativo para a iniciativa privada, se tiver que operar em leis e regras da livre concorrência de mercado.



Figura 9: Unidade de Recebimento de Pequenos Volumes - URPV da R. Barão Homem de Melo, n. 300, Belo Horizonte/MG (fotos do autor).

2.4.2 Campinas/SP

A Prefeitura de Campinas instalou em 2004 uma grande usina de reciclagem de RCC (Figura 10). Com uma capacidade nominal de reciclagem aproximada de 60 m³/h, é composta por um alimentador vibratório, um britador de impacto, um separador magnético suspenso de limpeza automática, uma peneira vibratória de 4 “decks” e diversos transportadores de correia.

O processo de reciclagem é semelhante ao das demais usinas públicas brasileiras. O entulho recebido na usina chegava a 1300 t/dia no primeiro semestre de 2004, e era triado manualmente por 35 funcionários de uma cooperativa mantida com o lucro da venda dos materiais considerados contaminantes da fração de origem mineral.

Após a triagem e a partir de um alimentador vibratório, os resíduos são lançados no britador e, após passarem pelo separador magnético, são armazenados em cone (no caso da produção de brita corrida) ou levados para a peneira vibratória que os separam em até 5 frações granulométricas. O material não é vendido, mas consumido apenas em obras da própria prefeitura.

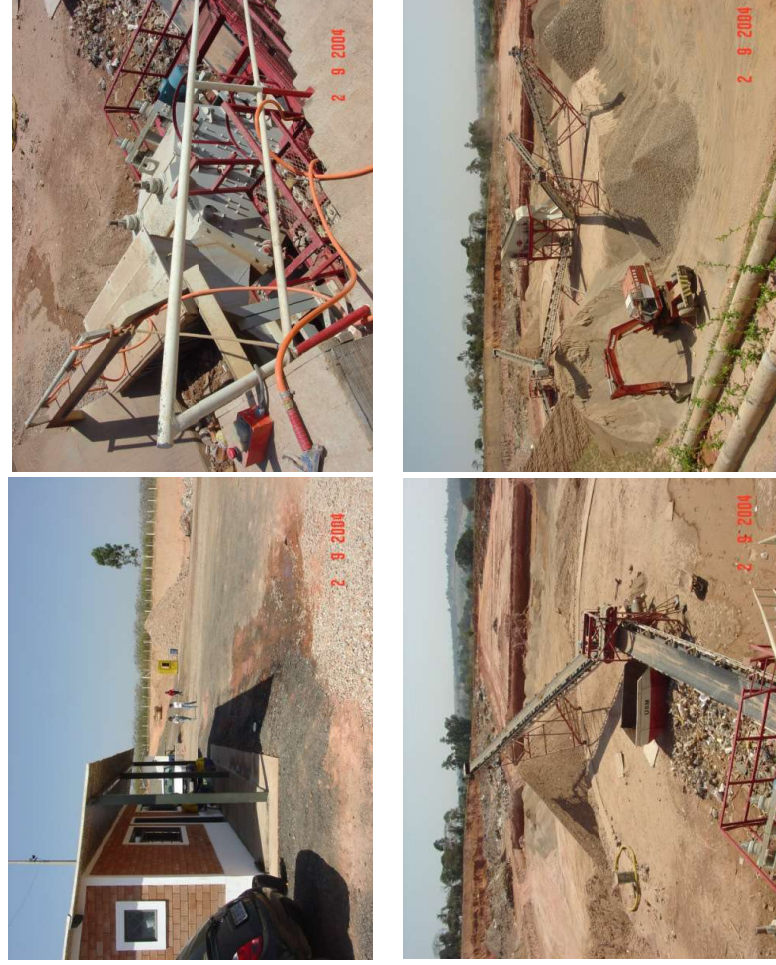


Figura 10: Usina de reciclagem da Prefeitura de Campinas/SP (fotos do autor).

2.4.3 Ciriáco/RS

Foi noticiado em 2003 pela internet que a Prefeitura de Ciriáco adquiriu um conjunto de britagem diferente das demais cidades. Tratava-se de uma usina de britagem móvel (Figura 11), instalada em cima da carroceria de um caminhão reformado e que podia se deslocar para qualquer comunidade do município, pois era movida a um motor diesel, não sendo necessária energia elétrica.

A decisão da Prefeitura em comprar este equipamento decorreu da falta de “cascalho” na região, reduzindo assim os custos de aquisição deste material (CIDADE DE CIRIÁCO, 2003).

A empresa vencedora da licitação foi a Metalúrgica Francapi Ltda, pelo custo de R\$ 78.120,00, sendo que o município entrou com a contrapartida de R\$ 38.120,00.



Figura 11: Usina móvel de reciclagem de RCC do município de Ciriaco/RS (CIDADE DE CIRIACO, 2003).

O britador é do tamanho 4025, o transportador de correia com dimensões de 6 m x 20 cm de largura (a brita já pode cair direto em cima da caçamba do caminhão), motor diesel resfriado a ar com 20 kW, equipado com alternador, partida elétrica, acoplado com embreagem e caixa redutora.

Esta usina móvel é capaz de produzir de 40 a 70 m³/dia de brita corrida. Entretanto, não se tem informações de sua atual utilização.

2.4.4 Macaé/RJ

A usina de reciclagem de RCC de Macaé foi inaugurada em março de 2000 pela Prefeitura da cidade, mas está em funcionamento desde novembro de 1999. Macaé investiu R\$190 mil na construção da usina de reciclagem de RCC, tendo recebido mais R\$110 mil do Governo Federal.

Os resíduos de concreto, tijolo, telha e outros fragmentos provenientes de obras são levados pela Secretaria de Serviços Públicos para um dos quatro pontos de recolhimento espalhados pela cidade. De lá os resíduos são encaminhados para a usina onde todos os materiais recebidos são separados, triturados e transformados em agregado reciclado.

A usina ocupa uma área de 30 mil m². No espaço também há unidades de armazenamento de RCC, para onde são encaminhados os materiais recolhidos.

Nessas unidades, o RCC classe A triado é enviado para a central de britagem para, em seguida, ser transportado para a fábrica de blocos pré-moldados.

Com 10 funcionários, ela está produzindo cerca de 360 t/mês de material reciclado da construção civil. Depois de quase quatro anos de funcionamento, a usina contabiliza uma produção diária de 600 blocos, 1.200 bloquetes e 60 meios-fios (MACAÉ ONLINE, 2003).



Figura 12: Usina de reciclagem de RCC de Macaé.

2.4.5 Piracicaba/SP

A usina de reciclagem pública de RCC da cidade de Piracicaba, localizada a 170 km da capital paulista, está localizada no bairro Algodão.

Com uma área aproximada de 15.000 m², possui capacidade de reciclagem de 175 m³/dia, sendo que a cidade produz cerca de 620 m³/dia. O percentual restante deverá ficar a cargo das empresas de transporte de entulhos, através de uma associação a ser formada para esta finalidade.

Comparativamente a outras usinas públicas do Brasil, a usina de Piracicaba se mostra bem equipada, principalmente, pela presença de duas peneiras vibratórias e um moinho de martelos, além de um britador de mandíbula, alimentador, separador magnético e diversos transportadores de correia (Figura 13).

Vários produtos estão sendo produzidos nesta usina. O agregado graúdo de predominância cerâmica é aplicado em obras de pavimentação, inclusive para tráfego pesado. O agregado miúdo de predominância também cerâmica é vendido para a população para o assentamento de alvenarias (Figura 14).



Figura 13: Equipamentos da usina de reciclagem de Piracicaba/SP (foto do autor).

Já a fração cinza de RCC (que é separada da vermelha visualmente quando o resíduo chega na usina) está sendo utilizada para produção de blocos de vedação e bloquetes para pisos que usados pela própria Prefeitura (Figura 15). Testes iniciais foram realizados nestes blocos em parceria com a Associação Brasileira de Cimentos Portland (ABCP), mas sem se tornar uma etapa contínua da produção.



(a)

(b)

Figura 14: Materiais produzidos na usina de Piracicaba/SP. a) Areia reciclada para assentamento de tijolos. b) Agregado graúdo reciclado (fotos do autor).



(a)



(b)



(c)

Figura 15: Fabricação de componentes na usina de Piracicaba/SP. a) Maquinário. b) Blocos de vedação. c) Blocos de vedação. (fotos do autor).

Um ponto interessante no processo de reciclagem de RCC daquela usina é a triagem do resíduo. O RCC é despejado neste terreno pelos caçambeiros da cidade, formando pilhas. Em cada pilha existe um grupo pré-definido de pessoas (de 6 a 10) que, trabalhando em forma de cooperativa com a ajuda de uma pá carregadeira da Prefeitura, removem outros tipos de resíduos misturados ao classe A, como metais, madeira, plásticos e papéis. Estes materiais removidos são vendidos pela cooperativa e os resíduos classe A são levados para a reciclagem (Figura 16).



Figura 16: Centro de triagem de RCC de Piracicaba/SP (fotos do autor).

2.4.6 São Bernardo do Campo/SP

A usina da empresa Urbem Tecnologia Ambiental, localizada em São Bernardo do Campo/SP, é um dos primeiros exemplos mais expressivos da iniciativa privada na área de reciclagem de RCC no Brasil.

Com uma área de cerca de 7200 m² (mais da metade pavimentada) e com o início das atividades em fevereiro de 2005, a usina conta com um britador de impacto com capacidade nominal de 40 m³/h, alimentador vibratório, separador magnético manual, peneira vibratória e 7 transportadores de correia, sendo um deles móvel para a escolha entre a produção de brita corrida ou material peneirado, além de diversos aspersores de água ao redor de toda a usina, na entrada e nas baias de armazenamento de material e uma cerca viva de pinheiros em fase de crescimento, para o controle da poeira.

Quando se produz brita corrida, utiliza-se RCC predominantemente cerâmico, que é armazenado separadamente dos RCC de base cimentícia, de cor “cinza”. Para a produção de material reciclado com controle granulométrico, isto é, que passa pelo processo de peneiramento, utilizam-se RCC com origem em concretos ou blocos de concreto, obtendo-se desta forma areia, pedrisco, brita e rachão, todos de cor cinza.

Considerando-se que esta usina está em fase inicial de suas atividades, o armazenamento separado de RCC de origem em concretos dos materiais cerâmicos e o volume expressivo recebido do primeiro tipo auxiliaram na obtenção de materiais

com maior qualidade, facilitando a entrada de reciclados da Urbem no mercado da região metropolitana de São Paulo.

De fato, observou-se uma certa rejeição dos consumidores quanto ao uso de materiais reciclados com origem em cerâmica vermelha, visto que a areia de cor avermelhada é tida como terra ou solo, mesmo sendo proibida a entrada desses resíduos naquela usina.

Aliás, o controle de aceitação de deposição de RCC na usina auxiliou na obtenção de bons agregados reciclados. Na Urbem, todo caminhão que pretende despejar RCC (pagando um preço que varia de R\$4,00 a R\$5,00 por m³, em maio de 2005) primeiro passa por uma avaliação visual de sua composição. A mínima presença de gesso, amianto ou solo é o suficiente para impedir o despejo de RCC. E se qualquer um destes materiais forem detectados após o despejo, o material é recolhido e levado para outro local.

A presença de papel, plástico ou madeira é permitida desde que em pequenas quantidades, já que são removidos pela triagem manual. A presença de metal é permitida, uma vez que este material é separado do concreto pelo próprio equipamento de britagem, ficando retido no separador magnético, e o lucro de sua venda é convertido em benefício financeiro para os funcionários da usina.

Todos que desejam despejar RCC nesta usina são avisados das regras para deposição e orientados a levarem somente RCC limpo, e a grande maioria dos transportadores segue as regras, pois vê a usina como uma parceira, uma vez que a presença de um local legalizado de deposição final de RCC reduz seus custos de transporte e aumenta seus lucros. O respeito aos critérios da usina é tal que, quando uma caçamba com RCC tem sua superfície aparentemente limpa, mas, ao bascular, surgem materiais indesejáveis, o próprio motorista do caminhão se dispõe a triar os contaminantes e a levá-los embora.

É óbvio que isto acontece também devido às possíveis consequências negativas para o caçambeiro:

- se tentar levar para a usina um material fora das regras de aceitação, corre o risco de não despejar e perder a viagem, gastando mais com transporte;

- se despejar RCC com contaminantes e não se dispuser a limpar ou levar embora, pode ficar proibido de levar RCC novamente para a usina, ficando em desvantagem com os seus concorrentes.



Figura 17: Usina de reciclagem de São Bernardo do Campo/SP, de propriedade da empresa Urbem Tecnologia Ambiental (foto do autor).

Quanto aos preços por m^3 dos materiais comercializados, estes eram de R\$ 12,00 para a brita corrida e R\$ 15,00 para qualquer um dos materiais oriundos da reciclagem de concreto, em maio de 2005.

Como resultado, tem-se, em apenas 8 meses de funcionamento, a venda de mais de 16.000 m^3 de agregados reciclados para a maioria das aplicações não estruturais e a aprovação destes materiais por laboratórios particulares de caracterização quanto ao especificado em norma brasileira de agregados reciclados.

2.4.7 São Paulo/SP

A usina da cidade de São Paulo/SP, localizada no bairro de Itaquera, operava em 2002 com um britador de impacto de grande capacidade (100 m^3/h), do tipo

móvel, movido por um gerador a diesel, além de um separador magnético e uma peneira de grande porte.

Os resíduos de construção civil eram classificados, assim como nas usinas de Belo Horizonte, em dois tipos: de cor “cinza” (resíduo com origem predominante em concreto) e de cor “vermelha” (resíduo cerâmico ou misto).

O britador é alimentado por duas pás mecânicas. Após britagem, o material passa por um separador magnético e então é levado para a peneira (no caso de agregados reciclados “cinzas”) ou para estocagem (no caso de agregados reciclados “vermelhos”).

A Figura 18a mostra detalhe do equipamento de britagem e a Figura 18b o separador magnético. Como toda usina é móvel, ela pode ser deslocada para outras localidades do município.



(a)



(b)

Figura 18: a) Detalhe da parte do britador de impacto. b) Detalhe do equipamento de separação magnética (ULSEN, KAHN, 2002).

Na usina de reciclagem, um separador magnético é utilizado para separar a fração metálica da fração mineral dos agregados britados. A correia pode ser movida para a parte superior das peneiras que executam a classificação dos agregados tipo A.

Na produção dos agregados do tipo “vermelho”, não existe preocupação com a classificação granulométrica como nos agregados de base cimentícia, mas apenas um controle da sua dimensão máxima. Também não existe qualquer preocupação com

procedimentos de caracterização ou de homogeneização desse agregado. Os materiais, depois de britados, são apenas estocados em pilha cônica.

Quanto à utilização dos materiais reciclados, os agregados de brita corrida eram empregados para base de pavimentação enquanto os agregados de cor “cinza” eram utilizados para aplicações típicas de infra-estrutura urbana.

2.4.8 Socorro/SP

A cidade de Socorro/SP possui, aproximadamente, 36 mil habitantes e está localizada a 140 km da capital paulista.

A usina de Socorro, de propriedade da Irmãos Preto Ltda. (Figura 19), trabalha com a coleta de entulho naquela cidade desde o ano de 1994. No entanto, até o ano de 2000, não tinha um destino final adequado para este material, descarregando-o em terrenos baldios ao redor da cidade. O entulho era usado para aterros aleatórios, podendo isto ocasionar vários problemas como degradação de áreas de preservação, destruição de mata ciliar nas margens de rios e córregos, poluição visual, proliferação de vetores causadores de doenças, como também possíveis contaminações de lençóis freáticos.

Além dos problemas ambientais causados, o aumento da fiscalização por parte dos órgãos ambientais, as dificuldades de se encontrar novas áreas disponíveis para aqueles aterros e as crescentes distâncias fizeram com que a empresa começasse a ter interesse em reciclar os resíduos de origem mineral coletados.

Apesar do pouco aporte de capital para investimentos, foram construídas, a partir de sucata, um elevador de canecas e uma peneira vibratória e conseguiu-se emprestado um equipamento de britagem. Foi contratado um funcionário responsável pela triagem visual, britagem e moagem do material.

Mesmo não tendo a certeza de conseguir comercializar os agregados produzidos a partir da reciclagem do entulho da construção civil, por questões de padrão de qualidade e aceitação do produto pelos consumidores, a venda de areia reciclada comum, não lavada e com elevado teor de finos para uso em argamassa de assentamento começou a ser desenvolvida pela empresa Irmãos Preto em 2000.

Entre o período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2001 foram realizados investimentos financeiros da ordem de R\$100.000,00 (cem mil reais) distribuídos entre aquisição de equipamentos, contratação de mão-de-obra, manutenção do projeto e infra-estrutura, como detalhado abaixo:

- aquisição de elevador de canecas para transporte do RCC britado até a peneira;
- aquisição do britador de mandíbulas tamanho 3020, marca Plang;
- peneira vibratória: para separar o agregado reciclado em duas granulometrias diferentes;
- caminhão Chevrolet D-60 ano 1981 com poli-guindaste, para fazer a coleta de RCC nas construções e para transportar os materiais reciclados (areia e brita);
- construção de um galpão de estrutura metálica com 500 m² de área, utilizado para abrigar os equipamentos utilizados no processo de reciclagem, classificação e estocagem de RCC;

O patrimônio envolvido resultou então distribuído da seguinte forma: um terreno de 6.000 m² localizado a 3 km do centro da cidade, com uma casa de 70 m² (utilizada como escritório administrativo), um galpão de 500 m², 2 caminhões poli-guindaste, 40 caçambas de entulho com capacidade de 3 m³ cada, uma pá carregadeira pequena, 1 britador, 1 elevador de canecas, uma peneira vibratória e diversas ferramentas.

Seu procedimento operacional em 2001 constava de:

- coleta – o entulho é coletado nas construções e demolições por caçambas estacionárias e transportado por caminhão poli-guindaste até o pátio da empresa, onde são descarregados;
- classificação visual – a seguir é feita uma classificação dos materiais, retirando-se manualmente do entulho a fração não mineral (madeira, plástico, vidro, papel e metal) e o gesso;

- processamento – após a classificação, o entulho é britado em um britador de mandíbulas. O material resultante desta britagem segue por um elevador de canecas até a peneira vibratória, responsável pela separação do material em dois novos produtos: agregado miúdo e agregado graúdo;
- comercialização dos agregados – o agregado miúdo é o material passante na peneira de malha 4,8 mm e é vendido em caçambas de 3 m³, para o preparo de argamassas de assentamento de alvenarias de tijolos maciços de vedação, comum em diversas construções da cidade. O agregado graúdo é o material retido na tela de abertura de malha 4,8 mm e é comercializado para a manutenção das estradas rurais do município, mas seu volume de venda é pequeno pois o microempresário não tem o apoio da prefeitura local para melhorar a venda deste tipo de agregado.

Os resultados quantitativos do Projeto, segundo levantamentos da empresa em março de 2002, podiam ser assim resumidos:

- coleta de 60% dos resíduos de construção e demolição, produzidos no ano pelo município: o volume de entulho coletado pela empresa no período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2001 foi de 8.000 toneladas, ou seja, cerca de 60% do volume anual produzido. Dessas 8.000 toneladas de entulho coletadas, cerca de 30%, ou seja, 2.400 toneladas, eram compostas por madeira, papel, vidro, plástico e metais, não sendo, portanto, utilizadas para reciclagem. Assim, o volume de entulho reciclável estava em torno de 11.600 toneladas por ano;
- aproveitamento de 16% do volume reciclável, na comercialização de agregados para argamassas de assentamento de alvenarias comuns, retornando para a construção civil da cidade em torno de 1.850 toneladas de material reciclado;

- aproveitamento de 11% do volume reciclável, na comercialização de agregados para estradas rurais, onde foram utilizadas cerca de 1.320 t de material reciclado na forma de brita corrida.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 19: Usina de reciclagem de Socorro/SP, de propriedade da Irmãos Preto Ltda, em agosto de 2001. a) RCC a ser reciclado. b) alimentação manual do britador com o RCC a ser reciclado. c) Agregado miúdo produzido coma a reciclagem do RCC. d) Pá carregadeira transportando o RCC reciclado (fotos do autor).

Entretanto, esta usina também sofre da falta de controle tecnológico no material produzido. Não existem controles granulométricos, nem de contaminantes (sulfatos, cloretos, matéria orgânica, etc.), ou de propriedades de argamassas.

Como o material lá produzido é vendido, principalmente, para produção de argamassas de assentamento, o empresário desejava comercializá-la também para revestimento de paredes, mas logo percebeu maiores dificuldades com a qualidade do produto. Aliás, o microempresário fez tentativas de produzir agregado para revestimentos de argamassa, puro e misturado com 50% de areia natural, mas a

produção foi interrompida devido ao excesso de fissuras que surgiram nos revestimentos executados, provavelmente devido ao excesso de materiais pulverulentos ou finos presentes.

Esta dificuldade gerou sua busca por apoio acadêmico a partir da dissertação de MIRANDA (2000), resultando em parceria com este pesquisador e sua orientadora para a realização do programa experimental desta tese.

Em 2004, a empresa continuava produzindo agregados reciclados para serem utilizados em sub-base de pavimentação e na produção de argamassas para assentamento de alvenarias de vedação comuns, com um custo próximo ao do agregado natural (R\$ 25,00 o m³), contando com razoável aceitação pelo mercado consumidor local.

2.4.9 Vinhedo/SP

A cidade de Vinhedo tem aproximadamente 45 mil habitantes e localiza-se a 76 km da capital paulista.

A usina de reciclagem de RCC de Vinhedo/SP (Figura 20) ocupa uma área de 4750 m². Possui uma capacidade de reciclagem de 52 m³/dia, mas tem funcionado somente três dias por semana, De 30 a 40 m³/dia. Para recebimento de RCC seu funcionamento é diário e varia entre 20 a 25 m³/dia.

A usina está equipada com um britador de mandíbula, uma peneira com quatro “decks” e uma pá carregadeira. Possui um total de quatro funcionários: um tratorista, um funcionário para britagem de RCC, um para a triagem inicial dos resíduos e um responsável pela usina, sendo que os três primeiros só estão presentes três dias por semana.

As etapas do processo usado nesta usina são as seguintes:

- no momento de chegada do RCC na usina, ele é classificado visualmente em “cinza” e “vermelho” como as demais usinas já descritas;
- após passarem por um processo manual de retirada de contaminantes (plástico, madeira, aço e placas de gesso), os resíduos são reduzidos

de tamanho com uma marreta e levados para o britador de mandrúbulas com o auxílio de uma pá carregadeira;

- o material classificado como “vermelho” é então usado para pavimentação, como sub-base de estradas rurais. O material “cinza” é levado para peneiramento, posicionando manualmente o transportador de correia para este fim, que o separa em 4 frações granulométricas (agregado miúdo, pedrisco, brita 1 e brita 2) e então está pronto para ser vendido para produção de contrapisos, pelo preço de R\$12,00/m³ (em 2002).



(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 20: Usina de reciclagem de RCC de Vinhedo/SP. a) RCC em triagem. b) Equipamento de britagem. c) Peneira vibratória. d) Diferença de tonalidade entre os agregados reciclados tipos “cinza” e “vermelho” (fotos do autor).

Não faz parte da rotina desta usina realizar ensaios de caracterização das propriedades físicas, químicas ou mecânicas dos agregados produzidos, nem da presença de contaminantes.

Segundo informações verbais de um funcionário da usina de Vinhedo/SP dada a este autor, foram realizados testes para a produção de blocos para alvenaria de vedação com a utilização do agregado reciclado “cinza”. Foi aplicada a proporção de mistura 1: 3: 3, em volume (cimento, agregado miúdo e pedrisco), com o agregado pré-saturado por aproximadamente 10 minutos. Apesar de se ter utilizada a mesma proporção de mistura usada pela empresa produtora de blocos com agregados naturais, não foi possível atingir a mesma resistência à compressão, pois o valor máximo de resistência à compressão foi de 2,0 MPa, abaixo dos 2,5 MPa estipulados pela norma brasileira para blocos de vedação.

2.4.10 Resumo dos dados sobre as usinas nacionais

A Tabela 3 resume as características técnicas das usinas brasileiras analisadas neste capítulo, enquanto a

Tabela 4 faz um comparativo entre as características da usina privada Urbem e do modelo ROSE utilizado na Itália.

Tabela 3: Resumo das principais características técnicas de algumas das usinas de reciclagem de RCC brasileiras.

Cidade	Propriedade	Capacidade nominal, em t/h	Peneiramento	Separação magnética
Belo Horizonte	Prefeitura	30	Sim	Sim
Belo Horizonte	Prefeitura	15	Não	Sim
Campinas	Prefeitura	70	Sim	Sim
Macaé	Prefeitura	8	Sim	Sim
Piracicaba	Prefeitura	220	Sim	Sim
São Bernardo do Campo	Urbem	50	Sim	Sim
São Paulo	Prefeitura	125	Sim	Sim
Socorro	Irmãos Preto	5	Sim	Não
Vinhedo	Prefeitura	8	Sim	Sim

Pode-se afirmar que, no Brasil, a conscientização sobre a importância da reciclagem do entulho, do desenvolvimento de pesquisas e o interesse das administrações públicas e do setor privado em investir neste mercado tem crescido intensamente, principalmente nos últimos 5 anos. Entretanto, ainda é necessário melhorar muito a qualidade das usinas nacionais, principalmente no que diz respeito ao projeto da planta e ao controle tecnológico dos materiais e componentes produzidos, para que sejam desenvolvidos novos mercados para o material reciclado.

Tabela 4: Comparativo das características da usina privada Urbem em São Bernardo do Campo e do modelo ROSE na Itália.

Característica	Usina Urbem	Usina ROSE
Controle de recebimento de RCC	Visual	Visual, por câmera
Estocagem do RCC com classificação visual	Sim	Sim
Natureza do RCC usado para produção de brita corrida	Cerâmica	Cerâmica e concreto, em proporções controladas
Uso de rompedores para britagem primária	Não	Sim
Separador magnético	Um, manual	Dois, automáticos
Peneira vibratória	3 “decks”	2 “decks”
Separação da fração leve dos resíduos	Manual	Automática, pela diferença de densidade
Armazenamento do agregado reciclado	Em cones	Pós-homogeneizado em pilhas de 12 m de altura
Carregamento dos caminhões	Por pá carregadeira	Por silos
Capacidade nominal	40 m ³ /h	50 m ³ /h
Número de funcionários na produção	6	3
Controle das máquinas, da produção e da manutenção	Por funcionários	Automático, computadorizado
Gasto energético	75 kW	100 kW
Controle de qualidade	Não	Sim, sistemático
Custo de produção de brita corrida	~ R\$6,00/m ³	~ R\$10,00/m ³
Preço do agregado reciclado em relação ao natural	50 a 70%	80 a 90%

2.5 Panorama do mercado nacional para agregados reciclados e aspectos restritivos

O consumo de agregados em todo o mundo é elevado, uma vez que são materiais essenciais na construção civil e que este é um setor de grande importância econômica para a maioria dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento.

Como exemplo, nos países da comunidade europeia, mais de 2 bilhões de toneladas de agregados são consumidos a cada ano (MOMBER, 2002).

Na Itália, da demanda total de agregados, aproximadamente 50 a 60% é utilizado em usos considerados de alta qualidade (concreto, argamassas, revestimentos, conglomerados, etc) e o restante 40-50% em outros serviços de engenharia civil como fundações, aterros, sub-bases (BRESSI, 2003).

Na região metropolitana de São Paulo (RMSP), o consumo de agregados naturais ultrapassa 30 milhões de toneladas por ano (Tabela 5).

Tabela 5: Consumo de areia na RMSP.

Aplicações da areia na Construção Civil	Concreto		Argamassas	Pavimentos públicos	Pré moldados	Total
	Usinado	Construtoras				
Segmentos de vendas ⁴ (%)	33	24	24	13	6	100
Consumo (10 ⁶ m ³ /ano)	10,4	7,5	7,6	4,3	2,2	31,8

Pela Tabela 5 acima, pode-se observar que 43% da areia consumida em RMSP é utilizada em aplicações sem fins estruturais (cerca de 14,1 milhões de m³ por ano). Isto mostra o grande mercado que existe para os produtos reciclados normalmente produzidos pelas usinas nacionais, descritos nos itens 2.5.1 a 2.5.4.

⁴ Informação obtida em WHITAKER (2001- Ano base: 2000) e pelo Sindpedras, em 18/07/2002, através do Sr. Raul B. Canceglieri, para a RMSP para Ano base 2001.

As usinas de reciclagem podem funcionar simplesmente produzindo e comercializando agregados reciclados ou produzindo componentes.

A produção de agregados apenas é o caso da maioria das usinas brasileiras já que, em geral, essa atividade engloba um processo de produção mais simples, com menor custo de investimento e de produção, menor controle de qualidade do produto e, portanto, produzindo um material com menor custo e valor agregado.

Usinas desse tipo produzem agregados para uso mais simples, como base e sub-bases de pavimentos, para produção de argamassas de assentamento de alvenaria de vedação e de contrapisos ou, nos melhores casos, para concretos não estruturais, separados em frações granulométricas (graúdo e miúdo).

A definição de qual agregado é a melhor alternativa em termos de retorno financeiro dependerá de um estudo de mercado para cada região. As alternativas de aplicação e algumas particularidades dos diversos tipos de agregados reciclados estão descritas a seguir.

2.5.1 Brita corrida reciclada para pavimentos

SIMONS; HENDERIECKX (1994) consideram a construção de rodovias o primeiro mercado para os produtos reciclados. Se o uso desses produtos for admitido, a qualidade puder ser certificada e o preço for atrativo, um largo mercado estará criado.

Na Holanda, a qualidade e preço favoráveis da brita corrida reciclada em comparação à tradicional usada como material para base de estradas faz com que quase todo entulho britado seja vendido para a indústria de pavimentação (HENDRIKS, 2000).

De fato, a utilização de brita corrida reciclada para bases e sub-bases é um mercado interessante, uma vez que consome grande volume de material cerâmico reciclado, é um produto competitivo economicamente em relação a outros do mercado para mesma finalidade, é de fácil produção e possui norma brasileira que o regulamenta, a NBR 15114/04 e cujo resumo das especificações consta no item 2.10.1.

Entretanto, este produto possui uma desvantagem comercial grande, que é o fato de seu consumo, no Brasil, ainda ser dependente da administração pública, uma vez que é ela quem controla a maioria das obras de pavimentação no país. Sendo assim, o público consumidor fica muito limitado.

Estimativas mercadológicas de *ANGULO et al. (2002)* apontam que o consumo deste tipo de agregado não é o suficiente para dar destino ao volume de resíduos da construção civil brasileira.

Neste ano de 2005, foi vivenciado por este autor, junto à usina Urbem, o fornecimento de brita corrida reciclada para pavimentação à Prefeitura de São Bernardo do Campo/SP (4.800 m³), à Prefeitura de Mauá/SP (3.600 m³) e à obra do campus da Universidade de São Paulo na zona leste da capital paulista, prevista para cerca de 10.000 m³. Outras prefeituras têm mostrado o interesse em consumir este material, como a de São Luís/MA, apesar de ainda não ter uma usina instalada nesta cidade. Entretanto, isto mostra que a tendência é que este mercado cresça bastante, à medida que a resolução CONAMA 307 seja implantada nos municípios.

O consumo de brita corrida por parte da iniciativa privada, além de ser muito menor, é mais seletivo, uma vez que este setor possui preferência por brita corrida oriunda de resíduo de concreto, e a quantidade disponível deste material para a reciclagem é mais limitada.

2.5.2 Agregados reciclados não lavados para concretos não estruturais

Os agregados reciclados por processo comum de reciclagem estão sendo aqui identificados como “não lavados” e podem ser areia, pedrisco ou brita.

Desses agregados reciclados comuns, este autor e a orientadora deste trabalho formaram opinião, desde *MIRANDA (2000)*, que a produção e emprego de areia reciclada para a produção de argamassas não estruturais pode ser uma alternativa factível e comercialmente atrativa para várias cidades brasileiras.

O elevado custo da areia natural, causado principalmente pela dificuldade de sua obtenção (longas distâncias de transporte, alcançando até 150 km), abre espaço para a entrada da areia reciclada no mercado de agregado miúdo para a construção

civil, como uma alternativa de se utilizar um material de qualidade compatível, porém de custo bem inferior.

Uma avaliação do mercado de areia de São Paulo foi realizada por este pesquisador e pelo Eng. Sérgio Angulo, sob a orientação da Prof. Sílvia Selmo, no âmbito do Projeto Casulo, conforme MIRANDA *et al.* (2005).

No 1º semestre de 2005, a areia reciclada de origem em resíduos cerâmicos era entregue em obra em Socorro/SP, pela usina Irmãos Preto por R\$25,00/m³. Preço semelhante era praticado pela usina Urbem em São Bernardo do Campo, porém para uma areia de origem em concreto reciclado. Na ocasião, a areia natural em São Paulo era vendida por R\$38,00 a R\$45,00 o m³.

De fato, a diferença de preço entre a areia natural e a areia reciclada, principalmente no caso da areia fina, torna a entrada deste produto reciclado no mercado facilitada.

Entretanto, a desvantagem da areia reciclada não lavada é seu número limitado de aplicações, principalmente se for de origem em RCC cerâmico. Seu uso para a produção de concretos estruturais, revestimentos de paredes, calçadas e, até mesmo, em contrapisos, muitas vezes dão como resultados perda de resistência mecânica, excesso de fissuração e aumento no consumo de cimento (ou queda de resistência para mesmo teor de cimento), causados pelo elevado teor de finos e de consumo de água.

Prejuízos semelhantes de resistência foram observados em trabalho de aluno de iniciação científica acompanhado por este autor durante esta tese, apenas pela substituição da areia natural por reciclada de concreto da usina de Socorro/SP (PEREZ, 2005).

Assim, exemplos típicos de potenciais aplicações desta areia são na produção de argamassas de assentamento, de enchimento de tubulações, cortinas ou outros usos secundários, onde ela teria a vantagem, além de seu menor custo, de não necessitar de adicionar cimento ou cal, conforme aplicação desejada, uma vez que seu teor de finos elevado pode conferir à massa trabalhabilidade e coesão mecânica suficientes para baixas resistências.

Mas, o uso limitado deste produto, associado ao preconceito do consumidor com relação à areia reciclada de RCC cerâmico, conforme item 2.7.3, limita a venda deste material.

Quanto ao pedrisco, a usina Urbem, que o produzia somente a partir de RCC de concreto, conseguia comercializá-lo para fábricas de blocos de concreto para alvenaria de vedação sem muita dificuldade, que preferiam que o pedrisco reciclado já fosse entregue misturado com areia reciclada.

Uma verificação dos blocos de vedação produzidos mostrou que, mesmo utilizando-se apenas RCC de concreto, a cor e a resistência dos blocos alterava levemente quando se utilizava areia reciclada na fabricação, mas sendo a diferença aceitável pelos fabricantes.

A utilização de pedrisco e areia reciclados de RCC cerâmico para a fabricação de blocos mostrou-se inviável, mesmo em pequenas quantidades, devido à queda de resistência e rejeição por parte dos consumidores por causa da cor final dos blocos.

A brita reciclada proveniente de concretos reciclados tem sido vendida na usina Urbem para a produção de concretos não estruturais, drenos, preparação da base de pavimentos, estacionamentos, etc.

O preço de venda para retirada na usina em abril de 2005 era de R\$15,00/m³, bem próximo ao da brita natural, que chegava a R\$18,00,00 o m³ nas pedreiras.

A proximidade nos preços no caso da brita é facilmente explicada. O processo de produção dos 2 tipos de brita é semelhante, utilizando-se equipamentos de mineração, aproximando-se o custo de produção. Em São Paulo, ainda existem pedreiras muito próximas à cidade, reduzindo o custo de frete. No caso da brita reciclada, tem-se a vantagem de se poder cobrar para receber a matéria-prima (RCC de concreto).

Sendo assim, observa-se que o raio de comercialização da brita reciclada, para a região próxima a São Paulo, é bem menor do que para a areia reciclada. Para outros locais, como São Luís/MA, onde a brita natural custa R\$35,00/m³ para retirar na pedreira ou de R\$50,00 a R\$60,00/m³ entregue na obra, a comercialização de brita reciclada pode ser atrativa.

2.5.3 Agregados reciclados para concreto estrutural

Outra possibilidade que existe é produzir agregados graúdos e miúdos para usos mais nobres como concreto estrutural, que pode ser conceituado como aquele de resistência característica à compressão de 15 MPa. Mas, no Brasil, até novembro de 2005, não foram encontradas usinas que comercializassem agregados reciclados para este fim.

Também, na Holanda, apesar da parte técnica estar bem desenvolvida, o uso de agregado reciclado em concreto não tem sido largamente comercializado por problemas econômicos. A margem de lucro é menor do que para material de sub-bases porque o agregado reciclado deve ser lavado e o resíduo da lavagem tem que ser removido, gerando custo. Além disso, existe a fração miúda do RCC que é produzida durante a britagem e que dificilmente é consumida para este fim (HENDRIKS, 2000).

Na Holanda, em relação aos consumidores, o uso de agregado reciclado em concreto estrutural tem as seguintes desvantagens (HENDRIKS, 2000):

- o produto pode não atingir a qualidade desejada. O consumidor alega ser contaminado ou incapaz de atingir a resistência desejada;
- o preço não é considerado favorável, tanto devido à lavagem como pelo uso de maior quantidade de cimento e controle;
- os fabricantes de concreto não possuem lugar para armazenar vários tipos de agregado;
- é necessário mais pesquisa e selo de qualidade/certificação para criar uma base firme e promover melhor o produto.

Em 2004, usinas de grande porte foram visitadas na Alemanha e na Itália pela orientadora deste trabalho e lá também não é usual a comercialização de agregados para concretos estruturais.

A normalização alemã atual, inclusive, limita em 20% o teor de substituição de agregado naturais por agregados reciclados de concreto para concretos estruturais.

Assim, o mercado de RCC para concretos terá que ser criado através de medidas externas, oferecendo maior margem de lucro para os fabricantes.

Atualmente, na Holanda existe um mercado potencial de 4,3 milhões de toneladas de RCC para uso em concreto, mas são supridos somente 100.000 toneladas (HENDRIKS, 2000).

2.5.4 Areia reciclada lavada e argamassas

Uma outra alternativa existente, mas ainda ausente nas usinas do Brasil, é que elas produzam não somente areia reciclada comum, mas também areia reciclada lavada e argamassas de qualidade controlada para alvenarias e revestimentos de paredes e tetos.

Com relação ao custo de produção, este pesquisador estima que o custo da areia reciclada lavada deva ser, aproximadamente, R\$5,00/m³ mais cara que a areia reciclada não lavada, devido aos gastos adicionais, principalmente com a água de lavagem.

Aliás, com relação ao processo de lavagem de areia, seu maior problema está na separação do material fino da água usada na lavagem, já que ainda não existe aplicação desenvolvida para ele e que a água deve ser retornada ao sistema para baratear o processo. Pesquisas em continuidade a esta tese, como a dissertação de NASCIMENTO (2005) e o projeto PIPE⁵ deste autor, irão tratar deste tema.

Pelos aspectos de consumo de areia já comentados no início deste item, considera-se que a produção de argamassas em usina de reciclagem é uma alternativa interessante. Os dados numéricos de consumo da Tabela 5, aliás, confirmam afirmações sucessivas desde SELMO (1989), de que no Brasil são frequentes os processos construtivos de edifícios que empregam paredes de alvenaria revestidas com argamassa, tanto no sistema de vedação interno como externo. Dados de LICHTENSTEIN (1987), confirmados por SOUZA; FRANCO (1997), mostram que o consumo estimado de argamassa em obra é de 0,13 m³/m² construído.

Em habitações de média e baixa renda, por exemplo, os conglomerados à base de cimento e agregados minerais perfazem 20% do custo médio das obras (SANTIN, 1996).

⁵ PIPE: Projeto de Inovação Tecnológica de Pequenas Empresas, financiado pela FAPESP.

Outro exemplo é o consumo e a distribuição do cimento no Brasil. Em 1998, foram produzidas no Brasil 38 milhões de toneladas de cimento Portland. Deste total, técnicos da área de cimentos apontaram que 40% estava sendo direcionado à produção de argamassas para a construção civil (MARTINS NETO; DJANIKIAN, 1999).

No caso de serem produzidas argamassas em usinas de reciclagem, é possível pensar nas seguintes opções de comercialização do produto:

- argamassa reciclada industrializada, em analogia às argamassas industrializadas com areias naturais ou de britagem, com ou sem aditivos e adições. As desvantagens neste caso é que seria necessário investir na secagem da areia, o que aumentaria o custo de investimento inicial e do produto final e haveria necessidade de aguardar a saturação prévia do agregado, o que poderia se tornar um contra-senso tecnológico e barreira para sua aceitação;
- argamassa reciclada intermediária (pré-mistura de cal e areia reciclada), úmida, ensacada ou a granel. Possuiria a vantagem de não necessitar de areia seca, diminuindo o investimento inicial, e já seria fornecida com a areia reciclada saturada, o que seria altamente produtivo e facilitaria a aceitação pelo consumidor.

Certamente, a partir da aceitação do produto no mercado, a comercialização de argamassas recicladas intermediárias poderão retornar um lucro bem superior ao da venda de areia reciclada apenas, devido ao valor agregado ao produto. Muito atrativo também pode ser o emprego apenas da argamassa intermediária simples, só de cal, em alvenarias não estruturais e revestimentos internos.

Quanto ao aspecto do preço de venda, são encontradas em lojas de materiais de construção argamassas industrializadas ensacadas, produzidas a partir de areia natural ou artificial (obtida pela moagem de rocha calcária, por exemplo), e comercializadas por um preço aproximado de R\$6,50 o saco de 20 kg. Mas estes fabricantes também fornecem o mesmo tipo de argamassa em silo, o que reduz significativamente o seu preço.

Entretanto, não é qualquer obra que pode optar em por um silo no canteiro e nem todas as cidades ainda podem ser servidas por este serviço. A tradição brasileira mostra que a grande maioria do volume consumido de argamassa, cerca de 95% é dosada na obra. Os outros 5% correspondem a um mercado recente das argamassas industrializadas, de cerca de 4% e de argamassas dosadas em central com uma participação inexpressiva de cerca de 1% (MARTINS NETO; DJANIKIAN, 1999).

Assim, o que se observa atualmente é que existe uma busca contínua das grandes empresas produtoras de argamassa industrializada em assumir uma parcela maior deste mercado, ainda dominado pela argamassa tradicional de cimento, cal e areia produzida em canteiro.

Desta forma, a argamassa de areia reciclada possui um mercado bem definido. Ela deve atender, com um menor custo e qualidade similar, aquele público que gostaria de utilizar argamassas industrializadas ensacadas, mas que não o faz pelo alto custo atual, não sendo assim concorrentes diretos. Em relação às argamassas dosadas em obra, a argamassa de areia reciclada pode apresentar vantagens técnicas e aumento de produtividade da obra, se gerada a partir de uma usina que comprove padrões mínimos aceitáveis de qualidade.

2.6 Gestão de RCC para a produção de agregados reciclados

Um dos pontos importantes para o sucesso da produção de agregados reciclados é a qualidade do RCC classe A obtido. Para que se garanta um agregado reciclado de qualidade, é necessário que sejam tomados alguns cuidados, desde a sua geração no canteiro-de-obras até sua entrada na usina de reciclagem.

2.6.1 Verificação e transporte dos resíduos

Antes de se iniciar qualquer atividade que produza RCC, é importante fazer uma análise do resíduo que será gerado. Isto otimizará a reciclagem, a reutilização ou o destino final apropriado do resíduo, além de atender à Resolução 307 do CONAMA.

Com esta avaliação preliminar do RCC é possível fazer um planejamento quanto à sua destinação, definindo (ACC, 2001):

- as naturezas e os volumes de resíduos produzidos por uma construção, reforma ou demolição;
- quais as melhores alternativas de reutilização, reciclagem, redução e eliminação dos diversos materiais que constituem os resíduos da construção civil;
- os custos e as economias a serem obtidas para cada tipo de destinação desses resíduos;
- os métodos a serem utilizados quanto à movimentação e armazenamento de RCC classe A e outros de interesse, de forma a evitar sua contaminação.

Considerando-se que cada fração de RCC tem uma destinação própria, a sua verificação deve permitir definir, “a priori”, para onde será levado cada tipo e por que agente transportador.

De acordo com o volume, a natureza, a distância de transporte e por quem será levado, as diferentes frações dos resíduos poderão representar receita ou custo. No caso de eliminação, é necessário definir os locais regulamentados para deposição, evitando-se despejos clandestinos.

Quanto à movimentação de RCC, ela deve ser feita por empresas transportadoras cadastradas nos órgãos municipais. competentes e isentas de quaisquer restrições cadastrais (SINDUSCON-SP, 2005).

O armazenamento deve garantir que outros materiais, como lixo e matéria-orgânica, não sejam misturados. As caçambas estacionárias, por exemplo, devem impedir que sejam depositados outros tipos de resíduo em seu interior (como tampas, por exemplo). Na Holanda, isto tem sido evitado proibindo a permanência de caçambas em período noturno e em finais de semana nas vias públicas (PUT, 2001).

A destinação dos resíduos deverá estar vinculada às condições apresentadas na Tabela 6, resumida de SINDUSCON-SP (2005).

Tabela 6: Áreas de destinação de RCC e condições para sua utilização, adaptado de SINDUSCON-SP (2005).

Tipo de área	Descrição	Condições para utilização	Observações
Ponto de entrega	Área pública ou viabilizada pela administração pública apta para o recebimento de pequenos volumes de resíduos de construção civil	Disponibilizada pela administração pública local como parte do Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil	Restrição ao recebimento de RCC constituído predominantemente por resíduos perigosos e não inertes (Classe I)
Área de transbordo e triagem	Estabelecimento privado ou público destinado ao recebimento de RCC e resíduos volumosos gerados e coletados por agentes privados e que deverá ser usada para a triagem dos resíduos recebidos, eventual transformação e posterior remoção para adequada disposição	Licenciada pela administração pública municipal	Restrição ao recebimento de cargas predominantemente constituídas por resíduos classe D
Área de reciclagem	Estabelecimento privado ou público destinado à transformação dos resíduos classe A em agregados	Licenciada pela administração pública municipal. No âmbito estadual, licenciamento pelo órgão de controle ambiental, expreso nas Licenças de Instalação e Operação.	Reciclagem predominante de resíduos classe A
Aterros de resíduos da construção civil	Estabelecimento privado ou público para disposição de RCC classe A no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente	Licenciamento municipal de acordo com legislação específica. Licenciamento estadual*.	Os resíduos classe B, C e D poderão apenas transitar pela área para serem, em seguida, transferidos para destinação adequada.

* No caso de São Paulo, os seguintes órgãos poderão estar envolvidos: CETESB, DAIA, DUSM e DEPRN.

A NBR 15114/04 define o seguinte:

- somente podem ser aceitos em área de reciclagem os resíduos de construção civil classe A (solos, tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassa, concreto e pré-moldados em concreto);
- nenhum resíduo pode ser aceito em área de reciclagem sem que sejam conhecidas sua procedência e composição;
- em área de reciclagem, deve ser previsto o controle de recebimento e operação, por meio de um plano que contemple: controle de entrada dos resíduos recebidos, discriminação dos procedimentos de triagem, reciclagem, armazenamento e outras operações realizadas na área, descrição e destinação dos resíduos a serem rejeitados, reutilizados e reciclados, controle de qualidade dos produtos gerados;
- os operadores devem providenciar o arquivamento dos controles de transporte de resíduos (CTR), referentes às cargas recebidas, mantendo os registros para eventual apresentação de relatório.

Até julho de 2005, na usina de reciclagem Urbem, somente RCC proveniente de grandes empresas ou de construtoras e demolidoras, que foram pressionadas por órgãos fiscalizadores, é que chegava à usina com CTR.

2.6.2 Triagem de RCC

Uma operação importante para a reciclagem é a triagem de RCC classe A. Um programa de triagem consiste em uma série de atividades de separação dos materiais reutilizáveis e recicláveis conforme sua natureza.

Por exemplo, deve ser removido do agregado reciclado o aço, betume, selante, plástico, madeira, papel e alumínio antes de ser utilizado como material secundário. Asfalto e concreto provenientes da quebra de pavimentos também podem possuir contaminações, tais como sais, resíduos de óleo e outros (HENDRIKS, 2000).

Esta é uma etapa de grande importância na reciclagem do RCC, uma vez que normalmente, antes de ser selecionado, ele pode apresentar mais de 5 frações

distintas e que, na maioria dos casos, a presença de mais de uma fração em teor significativo pode inviabilizar a reciclagem.

Três alternativas existem para a execução da triagem: na usina de reciclagem, em área de transbordo e triagem (ATT) e na origem (nos canteiros-de-obras). Cada uma possui suas vantagens e desvantagens, como descrito a seguir.

Quando se decide por implantar um sistema de triagem no canteiro-de-obras, é importante verificar primeiro se existe espaço suficiente para coleta, manutenção e armazenamento da quantidade prevista de RCC. Se o canteiro não possui espaço suficiente, pode-se estudar a possibilidade de utilizar temporariamente as propriedades adjacentes (ACC, 2001).

Neste caso, são colocados contêineres no canteiro-de-obras para armazenamento de diferentes frações, em tamanhos apropriados, claramente identificados, em local de fácil acesso para o despejo de RCC manual ou por coletores de entulho.

A triagem de RCC em canteiro-de-obras, visando sua reciclagem, era considerada, até pouco tempo atrás, impossível de ser realizada no Brasil. Isto porque não existia uma conscientização da importância da reciclagem de RCC, não existia o hábito e nem o interesse por parte das construtoras em fazer tal atividade no canteiro (uma vez que pode acarretar custos à obra) e, mesmo se houvesse o interesse, uma dificuldade presumível é definir onde levar o material selecionado para ser reciclado, pois são poucas as usinas de reciclagem no país, e este pode acabar sendo remisturado novamente a outros rejeitos.

Entretanto, atualmente, este panorama tem mudado, pelo menos, na cidade de São Paulo e em diversas outras cidades do país que, com a consultoria técnica da empresa Obra Limpa, tem implantado uma gestão racional de RCC no canteiro.

Aliás, não somente a triagem, mas também a reciclagem de RCC, pode ser realizada no próprio canteiro a partir de equipamentos de britagem ou moagem, muito embora haja alguns contrapontos a este respeito, como já analisado no início do item 2.4. Estes equipamentos podem ser utilizados para reciclar concreto, alvenaria, madeira e vidro. Devem ser considerados os seguintes itens antes de se optar por selecionar e reciclar o RCC em sua origem (ACC, 2001):

- disponibilizar a todos os trabalhadores e subcontratados o plano de gestão de RCC e sensibilizá-los da importância da reciclagem, pois muitos não têm o hábito de separar o entulho no canteiro-de-obra e podem não colaborar com este trabalho adicional;
- dimensionar e definir o local dos contêineres (de preferência próximo de onde serão produzidos os resíduos), designar os tipos de materiais e o método de transporte antes do início do projeto;
- selecionar os resíduos em cada andar e depois transportá-los ao térreo é mais barato;
- determinar o volume de material realmente útil para verificar a rentabilidade da reciclagem em canteiro;
- verificar os limites e as restrições locais quanto ao barulho e à poeira;
- determinar os custos, disponibilidade de equipamento, mercados de utilização final dos reciclados e as possibilidades de reutilização.

A triagem de RCC na usina de reciclagem pode causar problemas na qualidade do produto final, uma vez que uma triagem eficiente de um RCC muito contaminado é incomum. Entretanto, é possível que o material triado da fração mineral de RCC se torne uma fonte de renda bem interessante para a usina. Mas, para isso, é necessário que a usina esteja licenciada como área de transbordo, triagem e reciclagem (ATTR) e se enquadre na NBR 15112/04.

A triagem de RCC em ATT é uma solução intermediária entre as duas alternativas anteriores. Entretanto, pode apresentar alguns inconvenientes, no que diz respeito à qualidade da triagem:

- em alguns casos, são triados nestes locais somente aqueles materiais que possuem valor comercial, ficando as demais impurezas incorporadas à fração principal, em geral, da classe A;
- algumas ATT não possuem área física suficiente para uma classificação visual de resíduos classe A, quanto à sua natureza, de forma a separar a fração cerâmica da fração de concreto. Considerando que algumas ATT destinam seus resíduos de origem

mineral triados para usinas de reciclagem e que estas podem cobrar um preço mais baixo para receber resíduos de concreto, pode ser interessante economicamente para as ATT que elas organizem melhor seu trabalho e façam uma boa classificação visual dos resíduos;

- lotes de RCC com presença de gesso podem ser recebidos e misturados com lotes isentos desse resíduo, contaminando a maior parte do estoque.

Como exemplo, a empresa Urbem de reciclagem parou de receber RCC oriundo de duas ATT da região do ABC (estado de São Paulo) por elas não conseguirem fornecer material com qualidade suficiente para a reciclagem, geralmente muito contaminado por gesso, madeira e matéria orgânica.

Vale ressaltar a dificuldade que ainda existe na etapa de triagem do gesso de RCC não segregado na origem. Uma triagem eficiente deste material na usina é praticamente impossível de ser realizada, uma vez que chega em pequenos pedaços totalmente misturados com grandes volumes de RCC. O que pode ser feito é simplesmente negar o recebimento do lote. As ATT têm o mesmo problema na triagem, mas, como dito anteriormente, ainda pode ter a agravante de contaminarem lotes puros de RCC. Ou seja, a melhor alternativa é que o gesso seja triado na origem de sua utilização, ou seja, no canteiro. Entretanto, algumas construtoras que têm feito isso estão tendo dificuldade em encontrar um local para despejá-lo.

A reciclagem é um ciclo que envolve a participação de construtores e demolidores, transportadores, fornecedores de insumos, órgãos públicos e da iniciativa privada e a existência de mercado consumidor onde, a falta de qualquer um destes elos inviabiliza todo o processo. E a dificuldade descrita acima é apenas uma das existentes, pois há outras descritas no item 2.7 a seguir e todas são, na verdade, apenas um simples reflexo da etapa inicial na qual a reciclagem se encontra no país.

2.7 Dificuldades técnicas encontradas na reciclagem

Apesar do RCC vir sendo utilizado em obras de engenharia desde a Roma antiga e até mesmo existirem locais como Londres, Berlim e Varsóvia, que são exemplos de cidades reconstruídas com os escombros produzidos durante a II Guerra

Mundial (CABRERA *et al.*, 1997), a sua reciclagem em grande escala tem encontrado algumas dificuldades para se organizar como atividade comercial e industrial.

De fato, uma revisão da história mostra que é necessário tratar o RCC antes de utilizá-lo. Na Alemanha, por exemplo, foram considerados muito ruins os resultados obtidos quando foram utilizados na construção civil, sem nenhum tipo de tratamento, durante a II Guerra Mundial (BRESSI, 2003).

Entre os principais problemas que dificultam a reciclagem de RCC, pode-se citar sua variabilidade de composição, a presença de contaminações e o preconceito pela sociedade com o material reciclado.

2.7.1 Variabilidade da composição de RCC

A maioria das matérias-primas primárias de origem natural possui composição homogênea, conforme a natureza da jazida de ocorrência. Devido a esta homogeneidade, é possível utilizá-la em processos de fabricação com operações relativamente simples. Com matérias-primas secundárias, entretanto, isto é completamente diferente, pois se tratam de produtos descartados, com composições complexas e cuja reutilização só é possível após tratamento (HENDRIKS, 2000).

Do ponto de vista industrial, uma das principais dificuldades que se enfrenta para a produção de blocos e argamassas com agregados reciclados de RCC é a sua elevada heterogeneidade, que pode variar de acordo com o tipo ou etapa da obra, do país ou região, em função da diversidade de tecnologias construtivas utilizadas.

Como exemplo, o gesso é fartamente encontrado na construção americana e européia e só recentemente vem sendo utilizado nos maiores centros urbanos brasileiros (PINTO, 1999). No Canadá, concreto, madeira e asfalto são os materiais mais encontrados em RCC, correspondendo a 71% deles (ACC, 2001). Em países já desenvolvidos, os resíduos de demolição são maiores que os de construção, enquanto no Brasil os dados são ainda escassos.

De acordo com o resultado de pesquisas feitas com coletores de RCC em São Paulo, as reformas e ampliações são responsáveis por cerca de 52% das remoções efetivadas (PINTO, 1999).

O SINDUSCON-SP (2005) afirma que cerca de 75% dos resíduos gerados pela construção nos municípios provêm de eventos informais (obras de construção, reformas e demolições, geralmente realizadas pelos próprios usuários dos imóveis). Assim, é importante que sejam feitos esforços para se captar de forma racional os resíduos gerados pelo setor informal.

A Tabela 7 abaixo apresenta resultados da composição de RCC no Brasil e no estrangeiro, sendo predominantes os resíduos de concreto, argamassa e materiais cerâmicos.

Tabela 7: Composição de RCC em diversos locais do Brasil e no estrangeiro, em %.

Materiais	Holanda ¹	Flandres ²	Salvador ³	São Carlos ⁴
Cerâmica	39	3,4	14	29
Madeira	17	Nd	Nd	Nd
Concreto	13	41	53	4
Argamassas	8	Nd		64
Tijolos/blocos	14	40	Nd	Nd
Outros	9	16	33	3

¹ BOSSINK; BROUWERS (1996) *apud* ANGULO (2000), para resíduos de novas construções.

² SIMONS, HENDERIECKX (1994). Região norte da Bélgica.

³ CARNEIRO (2000).

⁴ PINTO (1986).

De fato, também na usina Urbem de reciclagem de RCC foi possível observar a preocupação de alguns consumidores com relação à homogeneidade dos produtos reciclados, principalmente da brita corrida, da areia e da brita. Isto mostra que desenvolver um processo de produção que garanta um produto com propriedades controladas é uma necessidade técnica e comercial, como vislumbrado por este autor e sua orientadora no desenvolvimento desta tese a partir de 2001.

2.7.2 Presença de contaminantes

Independente da triagem ser feita no canteiro-de-obra ou na usina de reciclagem, os resíduos da construção civil sempre apresentarão diversas naturezas de materiais, inerentes ao próprio processo de construção ou de demolição. Entre

estes materiais considerados contaminantes, os mais comuns são solo, madeira, vidro, plástico, papel, metais, gesso e asfalto.

Estes contaminantes podem ser oriundas tanto da fase de uso da construção que lhes deram origem quanto do seu manuseio posterior, e podem afetar o ambiente e a qualidade técnica do produto contendo o material reciclado (JOHN; AGOPYAN, 2003).

Também nos resíduos de demolição, principalmente de construções industriais, existe a possibilidade que outras categorias de resíduos que não se enquadrem como Classe A sejam reciclados, acidentalmente ou não (BRESSI, 2003).

Como exemplo do efeito de alguns contaminantes, os sulfatos e outros sais solúveis em elevados teores podem causar expansão em argamassas devido à formação de etringita pela sua reação com o C₃A do cimento. O teor de sulfato aceito pelas normas atualmente varia bastante, conforme será apresentado no item 2.10.

Os cloretos podem causar corrosão em armaduras e acelerar a pega do cimento. No trabalho de CARNEIRO *et al.* (2000) os ensaios não mostraram presença de gesso e o nível de cloretos encontrados na fração graúda e miúda são similares àquelas encontradas no agregado natural de Salvador, que não requer procedimentos de lavagem.

Outras contaminações menos encontradas, mas que não devem ser secundarizadas, principalmente no caso de demolições industriais, são os chamados resíduos perigosos, definidos pela ACC (2001) como substâncias, materiais, mercadorias e produtos perigosos tais como os venenos, agentes corrosivos, substâncias inflamáveis, munições, explosivos, substâncias radioativas, metais pesados ou qualquer outro material que constitua risco à saúde e ao bem estar do público ou para o ambiente, se não manipulados adequadamente. São também considerados resíduos perigosos o amianto, lâmpadas fluorescentes com vapor de mercúrio, pilhas contendo chumbo, ácido ou mercúrio e equipamentos de refrigeração contendo cloro-flúor-carbono (CFC).

Os resíduos perigosos exigem condições especiais de transporte e eliminação. Assim, antes de se efetuar obras de construção, reforma ou demolição, é necessário verificar a presença de materiais perigosos.

Em resumo, podem ser citados os seguintes problemas em concretos e argamassas devido à presença de contaminações: hidratação mais lenta do cimento (matéria orgânica), expansão devida à absorção de umidade (madeira) ou à formação de etringita (gesso), reação álcali-sílica (vidros) e redução de resistência (argila, matéria orgânica) (HENDRIKS, 2000).

Em relação à fração dos resíduos em que estes contaminantes aparecem, RUCH *et al.* (1997b) mostraram que a maior parte dos contaminante encontra-se nas frações abaixo de 8 mm.

Essas contaminações, após separadas, devem ser removidas da usina ou do canteiro. Caso não exista alguém interessado nestes materiais residuais, esta remoção terá um custo extra. Se não houver um local apropriado para a deposição, o problema se agrava e o custo de deposição final também.

Assim, no caso das obras que fazem triagem no canteiro e, principalmente, das usinas que recebem RCC não triados, é necessário arranjar uma finalidade ou reciclagem para todos os resíduos oriundos das atividades de construção civil, de preferência, com o menor custo possível.

Os itens 2.7.2.1 a 2.7.2.8 apresentam alternativas para redução, reutilização e reciclagem dos principais materiais contaminantes do RCC, quando se tem em vista a sua reciclagem para a produção de areia reciclada ou outros tipos de agregados.

2.7.2.1 Limpeza e escavação de canteiros-de-obras

São exemplos de materiais da limpeza e escavação de canteiros-de-obras: solo, árvores, entulhos mistos e vegetações.

No tocante ao emprego para argamassas, o solo, por possuir em sua composição grande quantidade de argila, quando utilizado para produção de argamassas, causa diminuição da resistência mecânica devido ao aumento no consumo de água e à presença de torrões. Além disso, a matéria orgânica presente no solo pode diminuir a durabilidade da argamassa e afetar a hidratação do cimento, por tornar o meio ácido.

Testes preliminares realizados em laboratório nesta pesquisa mostraram que corpos-de-prova feitos com cimento e solo somente endureceram após armazenados

em câmara seca. Durante os 7 dias que permaneceram na câmara úmida não apresentaram sinal de endurecimento.

Assim, em geral, o RCC produzido por limpeza ou escavação não é útil para a produção de componentes para a construção civil.

A Tabela 8 apresenta alternativas para a redução, reutilização, reciclagem e eliminação desse tipo de resíduo, sugeridas por ACC (2001).

Tabela 8: Alternativas sustentáveis para o tratamento ou destinação dos resíduos de solos, produzidos pela limpeza e escavação de canteiros-de-obras.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conservar a vegetação elaborando um plano de conservação antes do início do projeto e limitando a utilização de máquinas pesadas.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Replantar os arbustos e reutilizar o solo quando da terraplanagem final da obra e no nivelamento do terreno.
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Os materiais coletados podem ser transformados em madeira para obras, papel, aquecimento, combustível de caldeiras ou levados à compostagem. ▪ O solo pode ser encaminhado à outra obra para terraplenagem.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proibir a deposição em aterros de vegetação, bem como de materiais passíveis de compostagem.

2.7.2.2 Madeiras

Os resíduos de madeira produzidos das atividades de construção, reforma e demolição são normalmente oriundos de paletes, componentes e formas.

O mercado potencial dos resíduos reciclados de madeira compreende matéria-prima para fabricação de compósitos (painéis, por exemplo), uso como materiais de construção (por exemplo, ripas, forração de coberturas), polpa de papel, combustível, palha para animais, carvão, entre outros.

Deve-se evitar a queima de madeira pintada com verniz ou tintas à base de chumbo, devido à toxicidade. Madeiras cobertas com plástico ou impregnada têm suas alternativas de processamento limitadas.

A madeira deve ser removida do entulho antes da reciclagem, por processo mecânico, pirólise ou usando técnicas de peneiramento (por exemplo, banho em

água). Mas estas técnicas não estão sendo implementadas por serem muito caras (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹).

No Brasil, os resíduos de madeira que chegavam nas usinas de reciclagem ou nas áreas de transbordo e triagem (ATT), eram antes considerados um problema, mas agora já estão tendo um mercado novo. A madeira processada em picadores e transformada em cavaco pode ser vendida, por exemplo, para fornos de empresas ceramistas, por cerca de R\$15,00 / m³. Também existem empresas que retiram a madeira triada nas usinas em contêineres, sem custo para ambas as partes, caso ela não passe por processamento. Na usina Urbem, por exemplo, quando são juntados 40 m³ de madeira, uma empresa envia um caminhão gratuitamente para retirar.

Por isso, é interessante que as usinas de reciclagem de RCC se informem dos possíveis compradores deste resíduo, uma vez que é comum a sua presença em resíduos de interesse para a produção de agregados reciclados e que a sua disposição final pode acarretar custos extras à usina.

A Tabela 9 apresenta alternativas para a redução, reutilização, reciclagem e eliminação desse tipo de resíduo, sugeridas por ACC (2001).

Tabela 9: Alternativas sustentáveis para lidar com resíduos de madeira da construção civil.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Otimizar o uso da madeira no próprio andar da obra. ▪ Fornecer planos detalhados do vigamento. Os montantes e os barrotes podem ser fornecidos pré-cortados. ▪ Prever a recuperação da madeira de demolição. ▪ Comprar madeira seca e armazená-la adequadamente para reduzir as perdas associadas ao empeno e retração.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definir um lugar de armazenamento dos resíduos reutilizáveis. ▪ Reutilizar as madeiras de dimensões correntes oriundas da demolição. ▪ Recuperar os páletes danificados.
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produção de painéis, cama para animais ou como absorvente para derrames de petróleo ou combustível. ▪ Aceitar madeira com pregos.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumentar o custo de despejo se o volume de um carregamento exceder uma certa porcentagem de madeira.

2.7.2.3 Metais ferrosos e não ferrosos

A fonte de resíduos de metal na indústria da construção, reforma e demolição compreende principalmente as armaduras de aço, os sistemas elétricos e as embalagens de produtos. Como exemplo desses metais residuais, pode-se citar o aço, o alumínio, o cobre e o latão, entre outros. A Tabela 10 apresenta alternativas para redução, reutilização, reciclagem e eliminação de metais ferrosos e não ferrosos oriundos de RCC, sugeridos por ACC (2001).

Tabela 10: Alternativas sustentáveis para o tratamento de metais ferrosos e não ferrosos em RCC.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Encomendar os materiais de acordo com as necessidades. ▪ Medir e cortar os materiais com precisão. ▪ Colocar o painel de conexão elétrica perto do lugar de maior consumo. ▪ Registrar os excessos para reduzir o desperdício em obras futuras.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Armazenar as perdas num lugar central para fins de reutilização. ▪ Durante a obra, transportar os materiais em excesso para outra obra ou armazená-los fora do canteiro.
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Receber gratuitamente os restos de metais para reciclá-los. ▪ Informar-se sobre as opções de recolhimento e transporte de cada usina de reciclagem para definição de parceria.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proibir a deposição de grandes volumes.

HENDRIKS; JANSSEN (2001) consideram que o aço deve ser separado das demais frações de RCC sempre, pois aumenta os lucros da reciclagem. Entretanto, deve-se ressaltar que isso ocorre principalmente em instalações onde o equipamento de britagem instalado separa, junto com o separador magnético, o metal do restante da fração de origem mineral a ser reciclada.

Usinas com britadores de pequeno porte ou onde este foi instalado incorretamente podem não conseguir fazer a separação mecânica. Aí será necessário separar manualmente, por exemplo, o aço de um pilar, o que pode não compensar financeiramente devido à mão-de-obra e equipamento necessários.

Para otimizar a reciclagem dos metais, é importante entrar em contato com as empresas de reciclagem da região para conhecer suas exigências de como entregar os resíduos metálicos.

Em geral, empresas que compram sucatas aceitam qualquer tipo de metal, sendo que alguns como o cobre, o alumínio e o aço inoxidável possuem preços superiores para venda. Dependendo do volume mensal de aço retirado da usina, algumas empresas deixam uma caçamba à disposição, removem o metal e ainda pagam um valor diferenciado no quilo.

2.7.2.4 Betumes e derivados

O pavimento asfáltico é uma mistura de betume, areia, argila ou outros agregados minerais inertes, como o calcário, e pode ser reciclado como matéria-prima para pavimentos, telhas e impermeabilizantes.

O número de pavimentos asfálticos que foram objeto de reciclagem é bem maior que o de pavimentos rígidos de concreto, isto porque o asfalto pode ser regenerado com aditivos à base de óleo.

O pavimento asfáltico pode ser utilizado removido da superfície de uma rua, britado e utilizado como agregado ou mistura à quente para recobrir a mesma rua ou em projetos futuros de construção de estradas. Isto traz vantagens econômicas e ambientais, como a redução do consumo de agregados naturais e de produtos de petróleo.

Para a reciclagem a quente, o material é usado para estradas sujeitas a tráfego leve ou misturado com cimento para demais aplicações. Altas proporções de material podem ser utilizadas no processamento a quente (95%). A desvantagem deste processo é que hidrocarboneto poliaromático é liberado do chumbo contido no material (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹).

Para reciclagem a frio, o asfalto é triturado e o agente de regeneração é adicionado. Ou então pode ser ligado com cimento e usado no local de subbases de solo-cimento (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹).

A Tabela 11 apresenta alternativas para a redução, reutilização, reciclagem e eliminação de asfaltos oriundos de RCC, sugeridos por ACC (2001).

Tabela 11: Alternativas sustentáveis para o tratamento de asfaltos em RCC.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estabelecer medidas precisas e encomendar a quantidade necessária.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Telhas asfálticas podem servir para assentamento em lugares não visíveis, em outro canteiro-de-obras.
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ As calçadas e as telhas de asfalto podem servir como base subjacente granulada, novas calçadas e reparos, entradas residenciais, terraplenagem, telhas e estacionamentos.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cobrar taxa adicional para o despejo de asfalto não contaminado.

2.7.2.5 Derivados de papel

A maior parte do desperdício de papelão provém das embalagens, podendo representar uma fração importante do fluxo de desperdícios. Embora o papelão seja facilmente reciclado, devem-se concentrar esforços principalmente na redução do desperdício (Tabela 12). Normalmente, as empresas recicladoras de papel não compram embalagens de cimento.

Tabela 12: Alternativas sustentáveis para o tratamento de papelão em RCC.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Comprar materiais a granel para minimizar os desperdícios de embalagem. ▪ Incentivar os fornecedores a utilizar uma embalagem mínima. ▪ Privilegiar os fornecedores que recuperam as suas embalagens.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reutilizar as caixas de papelão para armazenar instrumentos ou pequenas quantidades de materiais (pregos, laços, tubos etc.).
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabricar caixas e cilindros de papelão e painéis de fibra. ▪ Conhecer a condições das empresas para reciclagem do papelão.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No Brasil o papelão não é aceito em aterros.

2.7.2.6 Gesso e derivados

Talvez o gesso tenha se tornado um dos principais problemas de contaminação de RCC, devido ao seu elevado volume gerado, à falta de empresas e mercados que invistam na reciclagem deste material e aos danos causados em argamassas e concretos produzidos com agregados contaminados por gesso.

De fato, cada vez mais a construção civil tem adotado o gesso como alternativa para revestimento de paredes, seja na forma de gesso acartonado ou revestimento produzido “in loco”.

Mesmo pequenos teores de gesso, como aqueles de revestimento de alvenarias, já podem ser suficientes para causar alterações na microestrutura e nas propriedades de argamassas de assentamento como demonstrado em pesquisa de apoio a esta tese por AGUIAR (2004) e SHIROMA (2005), com a participação da orientadora desta tese. E uma remoção eficiente de gesso de um lote de RCC não é simples, uma vez que ele se apresenta em pequenos pedaços e até mesmo em pó.

Aliás, a reciclagem do gesso acartonado não é uma tarefa simples, uma vez que outros materiais, como papelão, pintura e papéis de parede normalmente encontram-se aderidos a ele.

Quanto à aplicação de gesso diretamente sobre alvenaria, esta atividade praticamente impossibilita a reciclagem do RCC quando esta obra for demolida.

Com isto, a utilização do gesso nas obras já está causando um reflexo negativo para a reciclagem: na usina Urbem, de São Bernardo do Campo, por exemplo, como não é possível estimar exatamente a quantidade de gesso que tem em um lote, para garantir a qualidade do produto reciclado basta ser encontrado um único pedaço de gesso no caminhão para que ele seja negado. Mas não se pode afirmar que o mesmo critério seja válido ou vigente em outras usinas.

A Tabela 13 apresenta alternativas para a redução, reutilização, reciclagem e eliminação de painéis de gesso oriundos do RCC, sugeridos por ACC (2001).

Tabela 13: Alternativas sustentáveis para a manipulação de painéis de gesso em RCC.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Padronizar as peças em cada andar para reduzir retalhos. ▪ Evitar juntas com fita e gesso que dificultam sua localização e a dos parafusos deixando os painéis irrecuperáveis.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reutilizar pequenos pedaços nas cavidades das paredes internas, melhorando o isolamento acústico. ▪ Examinar primeiro os retalhos antes de cortar um painel novo.
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permitir certas quantidades de gipsita moída no solo arável e em materiais básicos para pavimentação. É necessária autorização prévia para evitar a contaminação de águas subterrâneas. ▪ Usar gipsita não contaminada no fabrico de cama para animais.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Não aceitar divisórias secas para produção de novas divisórias porque, normalmente, são contaminadas por pintura, gesso, papel de parede ou material vinílico. ▪ Proibir o despejo de divisórias secas.

2.7.2.7 Materiais plásticos

Os plásticos encontrados em locais de aterro de RCC são geralmente embalagens, revestimento e tubos.

Atualmente, a taxa de recuperação de materiais plásticos depositados é muito baixa. Os principais problemas que dificultam a reciclagem do plástico produzido pela indústria da construção civil são os numerosos tipos de plástico, a falta de identificação do tipo preciso de plástico e a incapacidade de se determinar se o plástico é reciclável ou não (ACC, 2001).

Mas, devido à grande quantidade de material plástico despejado nos aterros, tornou-se importante desenvolver técnicas de reciclagem desses resíduos. Hoje já é possível reciclar diversos tipos de plásticos para produtos de segunda geração como sacos, bancos de parque, tubos de drenagem, cones de circulação e numerosos produtos de matéria plástica (ACC, 2001).

A Tabela 14 apresenta alternativas para manejo ou destinação de materiais plásticos oriundos de RCC, sugeridos por ACC (2001).

Tabela 14: Alternativas para a destinação de materiais plásticos em RCC.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Obrigar os fornecedores a reduzir ou coletar as suas embalagens plásticas. ▪ Utilizar dimensões padronizadas para reduzir o corte.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ O adesivo do pavimento vinílico dificulta sua reutilização. ▪ Os tubos de PVC podem ser reutilizados em outros projetos.
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Avaliar o tipo e quantidade mínima de material aceito pela recicladora. ▪ Os adesivos contaminam o plástico e o vinil e impedem sua reciclagem.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deve ser sempre reciclado, devido ao volume e tempo para degradação.

2.7.2.8 Outros componentes e elementos de construção

Os componentes e elementos de construção encontrados em RCC são potencialmente recuperáveis, tais como materiais elétricos, portas, janelas, tapetes, isolação, equipamentos sanitários, peças e estruturas de telhado.

A recuperação desses materiais de construção depende principalmente de um projeto adequado de construção, reforma e de demolição.

2.7.3 Preconceitos quanto ao uso de agregados reciclados

Mesmo com tantas razões para que seja utilizado agregado reciclado, é possível perceber que ainda existe preconceito da sociedade brasileira quanto ao seu uso, principalmente quando ele é originado da reciclagem de resíduo de cerâmica vermelha.

Em Socorro/SP, foi possível observar a resistência de alguns pedreiros em usar areia reciclada que diziam que tal material não prestava, julgamento este feito em função da cor avermelhada da areia, chegando a dizer que não dariam garantia no serviço caso este fosse feito com areia reciclada.

Em São Bernardo do Campo, a usina Urbem sentiu a obrigação de fazer uma classificação visual de RCC em função do mercado consumidor, que somente aceita consumir agregados reciclados provenientes de concretos britados.

Até mesmo para a brita corrida percebe-se que alguns engenheiros têm receio de usá-la na pavimentação, principalmente por desconhecimento de seu desempenho e dos trabalhos acadêmicos ou de obras em curso no Brasil e no exterior.

De fato, no Brasil, o agregado reciclado é considerado um material de qualidade inferior, de segunda linha. Muitas construtoras decidem por não utilizá-lo com a desculpa de que sua obra é de alto padrão, com medo de que o uso de reciclados atrapalhe a imagem de sua empresa. Realmente, o agregado reciclado tem qualidade inferior, por exemplo, à maioria das areias naturais de rio.

Entretanto, deve-se ressaltar que os agregados reciclados têm suas aplicações muito bem definidas e, sendo isso respeitado por parte das usinas recicladoras e lojas de materiais de construção, é possível obter obras de alta qualidade com um custo inferior.

Entende-se que o preconceito existente é extremamente natural, considerando que este é um mercado novo e que a população ainda sofre com a desinformação quanto ao produto reciclado. Daí a importância das pesquisas acadêmicas atravessarem os muros das universidades, como feito no programa experimental

desta tese, e darem subsídio tecnológico às usinas, como preconizado em MIRANDA; SELMO (2003).

Mas, é certo que tal preconceito está diminuindo e será totalmente eliminado, graças às ações de pesquisadores e da iniciativa privada, que estão investindo cada vez mais na divulgação e, principalmente, na qualidade do agregado reciclado, transformando aos poucos as pessoas resistentes ao produto em consumidores potenciais.

2.8 Resíduos classe A de interesse para a produção de agregados reciclados

Dos materiais presentes em RCC, dois são particularmente importantes para a produção de areia reciclada para argamassas: as frações de concreto e de materiais cerâmicos.

2.8.1 Concretos

O concreto é considerado o material mais nobre encontrado em RCC, principalmente pela sua composição conter elevado teor de material pétreo e pelo fato de poder ser então melhor reutilizado para produção de novos concretos. Na Holanda, o concreto constitui cerca de 40% dos resíduos de construção civil (HENDRIKS, 2000).

No Brasil, não se tem um valor correto para o teor de resíduos de concreto em RCC e este valor varia bastante entre as cidades. Em São Bernardo, estima-se que o teor de concreto seja menor que 30%. Em Socorro/SP e São Luís/MA, menor que 10%. Pode-se afirmar que, na maioria das cidades brasileiras, a fração de concreto é menos expressiva do que a cerâmica e que, em geral, o seu teor tende a ser reduzido, principalmente:

- nas cidades de pequeno porte, onde se tem pouca atividade de demolição ou de instalações industriais;
- em locais onde existe abundância de argila para fabricação de tijolos cerâmicos, que é o caso de diversas localidades no Brasil.

O concreto sem a presença de armadura ou outras contaminações pode ser reciclado para diversas aplicações. Entretanto, considera-se que, sempre que

possível, ele deve ser aplicado na produção de novos concretos para aproveitar melhor seu potencial. Neste caso, HENDRIKS (2000) orienta o seguinte:

- agregado graúdo reciclado de concreto: usável em todo tipo de concreto. Até o teor de 20% não causa problema de resistência. Acima deste teor, deve ser avaliado;
- agregado miúdo reciclado de concreto: recomenda-se misturar com areia natural em teor menor ou igual a 50%. Não usar em concretos aparentes.

A Tabela 15 abaixo resume as alternativas para o tratamento de resíduos da produção de concreto, redução de desperdício, reutilização e reciclagem durante a fase de concretagem, propostas pela ACC (2001), mas com algumas adaptações por este autor.

Tabela 15: Alternativas para o tratamento de resíduos da produção de concreto.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evitar quantidade excessiva de concreto ao encomendar em centrais concreteiras. ▪ Evitar cortes em formas de madeira.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Remanejar os blocos de concreto não utilizados em uma obra para outra o mais rápido possível. ▪ Utilizar o concreto que sobrar de uma fase em outros fins ▪ Utilizar aditivos estabilizadores para uso prolongado do concreto.
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Destinar o concreto não contaminado para usinas recicladoras para a produção de agregados para sub-base de pavimentos, concretos e argamassas não estruturais.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Descartar em aterros apenas em situação de contaminação.

Todo ano uma grande quantidade de concreto também é produzido em centrais é retornado para deposição, seja por um excesso de perda de abatimento durante o transporte ou por ser enviado mais concreto que o necessário. Também cerca de 1500 l de água por caminhão é gasto para a lavagem do caminhão, gerando água residual e um resíduo de 300 kg de argamassas. O resíduo de concreto fresco e a água de lavagem são classificados como perigosos no EUA e, em muitos países europeus, a sua disposição é regulamentada por legislação ambiental (PAOLINI; KHURANA, 1998).

PAOLINI; KHURANA (1998) consideram possível reduzir substancialmente o resíduo de concreto e o custo nas concretéis utilizando-se aditivos inibidores e ativadores de pega. Estes aditivos podem controlar a hidratação por até 72 horas e podem ser utilizados para estabilizar concretos plásticos que retornaram à noite ou em finais de semana. Diferente dos retardadores comuns, o estabilizador apresenta a formação de núcleos de C-S-H quando adicionado à água de mistura. A adição do estabilizador em concretos não afeta de forma adversa qualquer das propriedades-chaves do concreto, seja no estado fresco ou endurecido, nem a sua durabilidade.

Com um processamento mínimo ou “in natura”, os resíduos de concreto podem ser usados para construção de estradas, barreiras contra barulho, preenchimento e levantamento do nível de terrenos, aterros, drenagens e terraplenagem (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹).

Na Holanda, mais de 90% do agregado secundário é usado na construção de estradas devido ao menor custo deste em relação ao natural para esta aplicação. O uso em concreto é marginal por causa dos altos custos comparado à matéria-prima primária (HENDRIKS; JANSSEN, 2001²).

Após lavagem, agregados de concreto reciclado podem ser usados como substituição do agregado graúdo em concretos. Este é o mais alto nível de aplicação para este agregado (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹).

Alguns problemas quanto à utilização de brita reciclada em concreto (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹) podem ser citados:

- é difícil atingir os requisitos de qualidade para concreto quanto aos contaminantes;
- os custos são aumentados devido ao aumento do controle de qualidade, armazenamento de agregado reciclado e modificação do processo de produção ou da composição do concreto;
- custos de transporte do local de demolição para a usina e desta para o local de construção;
- a percepção de que o agregado reciclado é resíduo;

- a resistência do concreto quando todo agregado graúdo é trocado por agregado reciclado é geralmente de 80 a 100% da resistência do concreto feito com agregado natural. Sua desvantagem é a menor densidade e a porosidade maior. Com isto, mais água é necessária para atingir total saturação do agregado.

Uma alternativa para encorajar o uso de agregado reciclado em concretos é a proibição de aterramento desses resíduos. Isto tem sido utilizado na Holanda desde 1997 e os resultados indicam que a política é muito efetiva desde que exista um sistema de controle (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹).

No Brasil, o concreto é um dos materiais mais tradicionais nas atividades de construção, em porcentagens que devem variar principalmente em função das características de cada cidade: idade, atividades industriais, tradição da construção civil local. Com os investimentos realizados pelas indústrias cimenteiras entre 1980 e 2000, na divulgação de artefatos à base de cimento como blocos de concreto, pisos intertravados, pavimento rígido, painéis pré-fabricados, por exemplo, é possível que a demanda aumente em alguns anos.

Para o uso na produção de argamassas, não se tem conhecimento de qualquer limitação relativa ao uso de agregados miúdos reciclados de concreto, desde que não estejam contaminados.

Entretanto, pode ser que não se obtenha trabalhabilidade adequada de argamassas feitas somente com agregado miúdo reciclado de concreto, podendo exigir modificações de dosagem. Isto ocorreu, por exemplo, em algumas obras visitadas por este pesquisador na cidade de Socorro/SP. Os pedreiros contatados não gostaram do material, afirmando que a argamassa produzida dessa forma tinha “pouca liga”. Além disso, devido à cor, estavam desconfiados de que se tratava de “saibro branco”, que é um material não aprovado na região.

Realmente, argamassas produzidas apenas com cimento e concreto reciclado apresentam menor coesão, devido ao pequeno teor de finos deste material e a menor capacidade plastificante destes finos em relação a outros, como a cal ou saibro por exemplo. Mas este problema pode ser facilmente contornado através da dosagem racional de uma adição plastificante.

2.8.2 Materiais cerâmicos e resíduos mistos

Assim como o concreto, os materiais cerâmicos de alvenarias podem representar uma fração importante do volume total de RCC. Nas usinas de Socorro/SP e São Bernardo Campo/SP, eles são a maioria.

Agregados reciclados de alvenaria, por exemplo, são mais ou menos comparáveis a agregados leves (HENDRIKS, 2000). Entretanto, deve ser considerado que existem diferentes naturezas de materiais cerâmicos e que cada uma pode influenciar de uma forma, quando se pretende utilizá-los para a produção de agregados.

Assim, este autor entende que podem existir resíduos cerâmicos que produzem argamassas com diferentes consumos de água e com teores variados de sais solúveis na composição e que os desafios para a reciclagem desses resíduos consistem ou na sua reciclagem por novos processos térmicos ou para a produção de areia e britas para usos não estruturais, como visa esta tese.

A Tabela 16 apresenta as principais alternativas para o manejo ou tratamento dos resíduos cerâmicos em RCC.

Tabela 16: Ações recomendáveis para o tratamento de resíduos cerâmicos em RCC.

Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilizar produtos de boa qualidade. ▪ Evitar cortes dos materiais dimensionando os vãos para tal. ▪ Cortar com cuidado as peças, com ferramentas apropriadas, para evitar perdas.
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reutilizar os materiais cerâmicos em outros projetos. ▪ Retirar a argamassa de materiais cerâmicos usados e reutilizá-los em alvenarias, sub-bases, enchimentos.
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Terraplenagem, correção de pH de solos, na produção de argamassas ou de novos blocos não estruturais.
Eliminar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Apenas descartar em aterros em situação de contaminação.

Geralmente, quando devidamente reciclados, os resíduos cerâmicos são aplicados em aterros, como bases e sub-bases de pavimentos e materiais de enchimento. Os tijolos e blocos quebrados podem servir de agregados na fabricação de pavimento asfáltico. Dependendo de sua composição química, podem ser finamente moídos e utilizados na correção de pH de solos. Em usos mais nobres,

pode-se citar a fabricação de vasos ornamentais, tijolos maciços e argamassas não estruturais.

O uso de resíduos cerâmicos para produção de concretos estruturais deve ser limitado, funcionando apenas como substituição parcial do agregado natural (HENDRIKS, 2000), da seguinte forma:

- agregado graúdo reciclado de alvenaria: somente para concretos de resistência até 25 MPa (classe B 25). Não usar em concretos expostos a elevadas umidades, a ciclos gelo-degelo ou a saís de degelo. Nenhuma alteração de resistência pode ocorrer quando seu teor é de até 10%;
- agregado miúdo reciclado de alvenaria: recomenda-se misturar com areia natural em teor menor ou igual a 50%. Não usar em concretos aparentes.

Uma boa aplicação deste material é na produção de tijolos queimados. Essa fração não deve conter cal para evitar efeitos sobre a resistência, retração, durabilidade e cor, a não ser que sejam produzidos tijolos de silicato de cálcio (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹).

Todavia, dificilmente resíduos de cerâmica vermelha estarão isentos de cal, sobretudo se forem de alvenarias ou de revestimentos cerâmicos antigos.

2.9 Principais equipamentos utilizados na reciclagem de resíduos classe A da construção civil

Uma etapa fundamental na tecnologia de reciclagem da fração de origem mineral de RCC, como agregado para a construção civil, e de interesse desta tese, é a que diz respeito às técnicas e aos equipamentos utilizados nas usinas.

Os resíduos classe A da construção civil, por serem uma matéria-prima secundária, geralmente requerem uma série de operações no processo de reciclagem, sendo as mais correntes a identificação, a classificação, a redução e a separação (HENDRIKS, 2000).

Estas etapas são geralmente realizadas utilizando-se equipamentos já citados na descrição das usinas brasileiras (item 2.4) e que podem ou devem ser utilizados para reciclagem do RCC, tanto mais quanto for necessário obter um material de qualidade. Isto não é difícil, uma vez que já existem diversos fabricantes no mercado capacitados a vendê-los e a prestar serviços de manutenção, além de permitir a aquisição por menores preços, pois podem ser recondicionados de outras indústrias, como é o caso da mineração.

Assim, outros equipamentos utilizados em processos a úmido de mineração e para a redução de variabilidade na área de tratamento de minérios são apresentados neste item como possíveis de serem aplicados em usinas de reciclagem com o intuito de melhorar a qualidade do material reciclado, apesar de nenhuma usina brasileira ter, até o momento, aplicado qualquer um deles em seu processo.

Aliás, esta tese irá apresentar em seu programa experimental um programa piloto para a introdução de processos via úmida na produção de areias recicladas para argamassas, como se pode vislumbrar pelo título do trabalho.

Diversas bibliografias podem ser encontradas a respeito de equipamentos para tratamento de minérios. Entretanto, este autor baseou sua revisão bibliográfica sobre este assunto, principalmente, na coleção de livros do Prof. Arthur P. Chaves e colaboradores, por ser esta uma obra de grande conteúdo e caráter prático.

2.9.1 Alimentador vibratório

O alimentador vibratório é o primeiro equipamento no processo de reciclagem de RCC. É ele quem recebe o RCC, trazido normalmente pela pá carregadeira ou retroscavadeira, e lança dentro do britador em uma vazão controlada pelo operador, dentro dos limites de dimensionamento da máquina.

O alimentador é composto, principalmente, de uma mesa vibratória apoiada sobre molas, grelha, tremonha e sobretremonha, motor elétrico e um eixo excêntrico duplo.

O eixo excêntrico é o responsável pelo movimento horizontal e vertical da mesa vibratória, que causam uma força resultante inclinada em 45°, responsável pelo

movimento das partículas. A vibração causada pelo eixo excêntrico pode ser regulada através do uso de contrapesos ou variando o tamanho da polia do motor.

A grelha do alimentador separa a fração fina de RCC antes que esta atinja o britador, reduzindo seu desgaste, sendo esta operação chamada de escalpe. A dimensão desta fração pode ser regulada abrindo ou fechando o espaçamento entre as barras da grelha, definida em função do material que se pretende produzir.

Recomenda-se fazer escalpe quando o teor de finos da alimentação ultrapassar 30%, o que facilmente pode ocorrer para RCC, antes mesmo da britagem primária.



Figura 21: Alimentador vibratório (fotos do autor).

2.9.2 Grelha vibratória

A grelha vibratória é um equipamento interessante quando se pretende trabalhar com 2 britadores, por exemplo, primário e secundário, para evitar sobrecarga ou desgaste desnecessário do britador secundário com frações menores que 5 mm de diâmetro. Em geral, ela é um equipamento robusto, mas com uma eficiência entre 60% e 70%, bem inferior à das peneiras vibratórias.



Figura 22: Grelha vibratória (FURLAN, 2003).

2.9.3 Equipamentos de transporte

Os sistemas de transporte também são equipamentos sempre presentes nas usinas de reciclagem de RCC.

Pode-se encontrar nas usinas, de acordo com a necessidade e o porte, transportadores de correia, elevadores de canecas ou de rosca.

Os transportadores de correia são considerados mais convenientes que veículos a diesel, pois são silenciosos, contínuos e mais baratos, além de serem elétricos. Sua largura deve ser pelo menos três vezes a dimensão máxima do material a ser transportado (CHAVES; PERES, 1999).

Sua principal limitação está no ângulo de transporte, uma vez que elevadas inclinações só são possíveis com a presença de taliscas na correia ou com o uso de transportadores fechados, para evitar o rolamento do material correia abaixo, sendo necessário às vezes grandes distâncias de transporte.



Figura 23: Transportadores de correia (foto do autor).

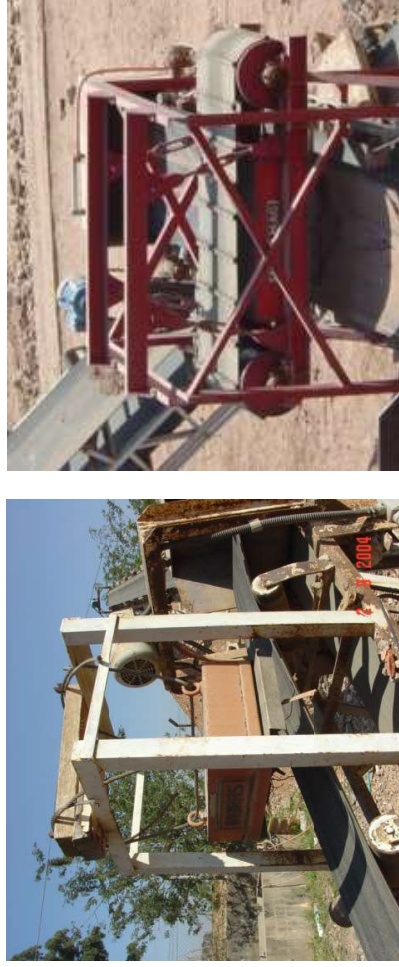
Quando se necessita vencer grandes alturas em pequenos espaços, pode-se também optar por transportadores inclinados de rosca ou de canecas, dependendo da granulometria.

2.9.4 Separadores magnéticos

Os separadores magnéticos são equipamentos colocados no processo de reciclagem, normalmente acima do transportador de correia, após o RCC passar pelo britador, com o intuito de remover os metais presentes.

São de grande importância no processo quando o RCC não passa por uma triagem prévia e, mais ainda, quando são utilizados moinhos de martelo, pois podem danificar as grelhas do moinho e, até mesmo, causar seu travamento, resultando em paradas constantes e indesejáveis no processo.

Os tipos mais utilizados são os separadores magnéticos suspensos, de magnetismo permanente (sem uso de energia elétrica), de limpeza automática ou manual (Figura 24) dependendo do grau de contaminação do entulho. O magnetismo pode ser proveniente de ímãs permanentes de ferrite de estrôncio anisotrópico ou outro material com propriedades magnéticas.



(a)

(b)

Figura 24: Separadores magnéticos suspensos e permanentes, de limpeza manual (a) e automática (b) (fotos do autor).

Para o correto dimensionamento do separador magnético, é necessário ter definido as seguintes variáveis:

- material a ser submetido à separação;
- densidade de massa específica desse material;
- largura da correia por onde passa esse material;
- localização ou posição do separador em relação à correia / calha: a 2,5 do início da correia, acima dela, distante de 10 cm;
- vazão de material a ser submetido à separação;
- altura da camada desse material sobre a correia;
- velocidade da correia;
- granulometria desse material;
- temperatura ambiente desse material;
- tipo de impureza ferrosa desse material;
- tamanho das impurezas ferrosas (menor e maior);
- grau de contaminação ferrosa;
- grau de contaminação ferrosa requerido após a separação magnética;

- se o separador magnético solicitado é de limpeza automática ou manual (caso já esteja definido pelo cliente);
- altura do separador magnético em relação à correia ou ao topo da camada, (caso já esteja definido pelo cliente);
- tensão de alimentação disponível.

2.9.5 Britadores

O conjunto de operações com o intuito de reduzir o tamanho das partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-determinado chama-se cominuição. O processo de cominuição inclui britagem e moagem das partículas (CHAVES; PERES, 1999).

A britagem de RCC é, em geral, o processo seguinte à triagem e à alimentação e é realizada normalmente com britadores de impacto ou de mandíbula. Cada um desses equipamentos possui princípios de funcionamento diferentes e produzem materiais com diferentes características.

O britador de mandíbulas (Figura 25) é considerado bom para capacidades de produção de até 1000 t/h e recomendado quando se deseja baixa quantidade de finos. Não possui restrições quanto às características mecânicas das rochas e materiais abrasivos, mas é menos indicado que o britador de impacto para materiais úmidos com alto teor de argila (LUZ *et al.*, 1998).

Dois tipos de britadores de mandíbulas podem ser encontrados no mercado: de dois eixos (Blake, movimento pendular, mais caro e mais resistente) e de um eixo (movimento circular, mais barato). Ambos têm mandíbulas com o material de desgaste em aço contendo de 12% a 14% de Mn, o que torna o aço austenítico (o impacto localizado encrua a estrutura austenítica, tornando-a muito dura).

Algumas características quanto aos britadores de mandíbula:

- potência entre 7,4 kW e 400 kW (10 a 500 cv, respectivamente), produção de 1,5 a 800 m³/h, velocidade de 300 a 100 rpm, relação de redução entre 4:1 e 9:1 (dependendo da etapa da britagem, primária,

secundária ou terciária), dimensões 125 mm (gapé⁶) x 150 mm (largura) a 1600 mm x 2100 mm, faz britagem primária e secundária (CHAVES; PERES, 1999);

- o material deve estar preferencialmente seco para diminuir o desgaste da mandíbula (teor de umidade < 10%). Além disso, se grande quantidade de material fino e úmido é alimentado, ele pode grudar nas mandíbulas e não escoar para baixo, causando o problema de empastamento. Se não for possível secar o material, pode-se avaliar a possibilidade de britar com excesso de umidade para evitar estes problemas;
- a quantidade de finos produzida pela britagem pode ser reduzida minimizando a área de aplicação de carga. Isso é feito usando britadores com superfícies corrugadas (LUZ *et al.*, 1998);
- tende a fornecer distribuições granulométricas constantes, independente do material que está sendo britado, dependendo apenas da geometria da câmara de britagem (ou seja, para um dado tamanho do britador e da abertura de descarga). Isto porque o comprimento da superfície britante é finito e as partículas se rompem sempre pelo mesmo mecanismo;
- a granulometria de saída e a produtividade sofrem influência da abertura de saída do britador, que por sua vez pode ser regulada;
- quando uma peça muito grande trava o britador, as correias patinam ou arrebitam, protegendo o motor;
- a abertura de saída é regulável. Entretanto, recomenda-se não trabalhar na abertura mínima por causa do desgaste excessivo da extremidade inferior da mandíbula, tornando impossível regulagens subsequentes, além de aumentar o consumo de energia, redução na produção e problemas de engaiolamento;

⁶ Gape é a distância entre a mandíbula móvel e fixa na parte superior do britador.

- pode apresentar os seguintes problemas: empastamento, entupimento (quando blocos maiores que o tamanho máximo admitido pelo britador entram nele), atolamento (as partículas podem se arrumar dentro do britador formando um arco que sustenta as partículas acima dele e impede a sua passagem) e afogamento (causado pelo aumento do volume ocupado pelas partículas com sua britagem – deve-se evitar alimentação acima da vazão crítica).

CHAVES; PERES (1999) apresentam um método para dimensionamento do britador a ser utilizado, bem como fórmulas para cálculo do consumo de energia (equação de Bond) e de desgaste das mandíbulas.



(a)



(b)

Figura 25: Britador de mandíbula tamanho 5030. (a) Vista lateral. (b) Vista superior mostrando a mandíbula fixa gasta (fotos de autor).

Os britadores de impactos também têm sido utilizados para reciclagem de RCC. Podem ser encontrados no mercado com eixo vertical ou horizontal.

Neste equipamento, as partículas são alimentadas ao britador e atingidas pelo impacto do rotor. Então são lançadas contra o revestimento onde sofrem fraturamento adicional. Em geral, as partículas recebem de uma a duas pancadas e tendem a atravessar o equipamento rapidamente. O efeito do impacto é desprezível para partículas menores que 0,15 mm. Dentro de certas limitações mecânicas, aumentando a velocidade do rotor, diminui a granulometria de saída (CHAVES; PERES, 1999).

Como características desse equipamento, podem ser citadas: distribuição granulométrica mais fina que a do britador de mandíbulas, mas com menor geração de materiais pulverulentos, uso limitado a rochas frágeis ou elásticas, efetivo para materiais com tendência a produzir partículas lamelares (gera formas mais cúbicas) e para materiais úmidos com alto teor de argila, alto grau de redução, elevado custo de manutenção e grande desgaste (não sendo aconselhável no caso de rochas abrasivas e de materiais com mais de 15% de sílica), elevada produtividade (LUZ *et al.*, 1998).

Alguns dados de britadores de impacto de eixo vertical: britagem terciária para rocha muito dura e abrasiva, menor desgaste e um produto mais cúbico que o moinho de martelos, capacidade entre 100 e 200 t/h, redução de 2:1, potência entre 55 e 150 kW.

Alguns dados de britadores de impacto de eixo horizontal: britagem primária, secundária e terciária de materiais brandos e friáveis, redução 40:1, capacidade de até 2500 t/h, produto bem classificado, de forma cúbica e com um mínimo de materiais pulverulentos, potência de até 450 kW.

Como pode ser observado, tanto o britador de mandíbula quanto o de impacto pode ser utilizado para a reciclagem de RCC, como já ocorre em diversas usinas do país. Cada um tem suas vantagens e desvantagens e, por isso, a definição de qual o equipamento ideal deve ser feita analisando caso a caso através, principalmente, de um estudo de mercado.

2.9.6 Moinhos

A moagem compreende as operações de cominuição na faixa de dimensões de partículas menores que 2 mm e é efetuada mediante os mecanismos de abrasão, arredondamento das partículas e quebra de pontas (CHAVES; PERES, 1999).

A moagem pode ser realizada em processo via seca ou úmida. Recomenda-se que o processamento via seca seja realizado somente quando existe alguma razão impeditiva para o processamento via úmida, como escassez de água ou quando o material a ser moído reage com água (CHAVES; PERES, 1999).

Algumas características do processamento via úmida (CHAVES; PERES, 1999):

- a água funciona como meio de transporte, dissipação de calor e abatimento da poeira;
- a polpa deve ter um teor de sólidos < 50%.

Algumas características do processamento via seca (CHAVES; PERES, 1999):

- menor desgaste dos revestimentos e corpos moedores, uma vez que o processo de corrosão é potencializado pelos eletrólitos presentes na polpa do processo via úmida;
- exige a instalação de equipamentos e dispositivos auxiliares para o abatimento das poeiras geradas no processo e para o transporte do material, resultando em maior consumo energético e investimento em relação ao processamento via úmida;
- a umidade não deve ultrapassar 5 a 7%.

Em geral, não são encontrados em usinas de reciclagem de RCC equipamentos de moagem (Figura 26), por normalmente se ter interesse em uma quantidade maior de agregado graúdo para aplicação em pavimentos.

A principal desvantagem da moagem é que esta é uma operação cara pelo desgaste dos equipamentos e energia consumida, devendo sempre ser muito bem analisada a sua real necessidade em função dos produtos a serem comercializados. No caso de uma usina voltada para a produção de argamassas pode-se considerar recomendável a sua inclusão no processo.



Figura 26: Moinho de martelos (fotos do autor).

2.9.7 Peneiras vibratórias

O peneiramento é o processo pela qual se faz a separação do material reciclado na usina em frações granulométricas controladas. Este processo em campo é feito normalmente através do uso de peneiras vibratórias (Figura 27). Este equipamento é composto de chassi robusto apoiado em molas, mecanismo acionador, com 1 a 4 “decks” (suportes de telas) e que podem ser inclinados (15° a 35°) ou horizontais (CHAVES; PERES, 1999).



Figura 27: Peneira vibratória inclinada (foto do autor).

A eficiência da peneira vibratória é normalmente medida utilizando-se a Equação 1.

$$Eficiência = \frac{U}{U_a} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

U = t/h de passante em uma dada peneira;

U_a = t/h de material passante presente na alimentação.

As peneiras vibratórias industriais devem ter eficiência entre 90% e 96% (CHAVES; PERES, 1999).

A eficiência do peneiramento pode ser prejudicada pela presença de umidade no material. A umidade presa em trincas, poros abertos e fechados no interior da

partícula não afeta o peneiramento. Só a umidade superficial interfere no peneiramento, que se torna impossível quando a umidade estiver entre 5% e 8% (para materiais naturais) e só volta a funcionar com umidade acima de 60% (CHAVES; PERES, 1999). Atualmente, existem telas metálicas que, devido ao seu projeto, são autolimantes, mas, normalmente, possuem menor vida útil.

Outros fatores que interferem na eficiência das peneiras são a inclinação (Tabela 17), a frequência e amplitude (Tabela 18), o comprimento da peneira e a área aberta da peneira.

Tabela 17: Ângulo de inclinação da peneira em função da abertura da malha, conforme recomendação da FAÇO (1994).

Ângulo (°)	20	19	15	10
Malha (")	6 a 4	4 a 1	2 ½ a ½	1 a 1/8

Tabela 18: Tabelas de frequência e amplitudes para peneiras vibratórias convencionais, conforme recomendação da FAÇO (1994).

Malha (") ou n° da peneira)	4	3	2	1	1/2	1/4	#10	#14
Rotação (rpm)	800	850	900	950	1000	1400	1500	1600
Amplitude	6,5	5,5	4,5	3,5	3,0	2,0	1,5	1,0

Em relação à produtividade das peneiras vibratórias, ela está relacionada à sua largura. Em geral, a produtividade aoiçoqñde peneiras vibratórias inclinadas está entre 50 e 200 t/m²/mm abertura/24h (LUZ *et al.*, 1998).

A Tabela 19 apresenta um resumo do comportamento das partículas a serem peneiradas sobre a peneira.

CHAVES; PERES (1999) apresentam alguns métodos de dimensionamento de peneiras vibratórias inclinadas, como o proposto por Bauman e pela FAÇO (Fábrica de Aço Paulista S.A). A seguir são apresentados alguns parâmetros considerados relevantes sobre este assunto:

- no dimensionamento e escolha da peneira deve-se considerar a capacidade de transporte das partículas, espaço para acomodação do

leito e tempo para que as partículas finas alcancem a tela e a atravessem;

- a amplitude deve lançar a partícula numa distância entre “a” e “1,5a”, sendo “a” a abertura da malha da peneira. Para partículas maiores, deve-se aumentar a amplitude e diminuir a frequência. Diminuindo a malha, deve-se diminuir a amplitude e aumentar a frequência;
- o comprimento da peneira é normalmente o dobro de sua largura (LUZ *et al.*, 1998);
- para haver uma estratificação satisfatória, é necessário que a altura do leito seja no máximo quatro vezes a abertura da tela.

Tabela 19: Comportamento do material sobre uma dada peneira (CHAVES; PERES, 1999).

Relação entre a dimensão da partícula (d) e a abertura da malha (a)	Comportamento do material
$d > 1,5a$	Material vai para o “oversize” sem acarretar problema no peneiramento, mas pode deformar ou desgastar a tela. Se a quantidade for grande deve-se usar um “deck” de alívio
$1,5a > d > a$	Material pode ficar preso na abertura da malha
$a > d > 0,5a$	É necessário um grande número de tentativas para que o material passe. É chamada de “faixa crítica”
$d < 0,5a$	O material passa sem problemas
$d \ll a$	Parte passa sem problemas e parte fica aderida aos grãos maiores. Se a quantidade for grande é necessário fazer lavagem

2.9.8 Equipamentos para processo de reciclagem via úmida

Existe a alternativa de se utilizar um processo a úmido de reciclagem que pode proporcionar uma maior qualidade de agregados reciclados de RCC pela remoção do excesso de material pulverulento proveniente da reciclagem (o que para alguns usos é indesejável) e dos contaminantes presentes na fração miúda como gesso, sais solúveis e matéria orgânica. Para isto, pode ser utilizado um sistema de lavagem sobre uma peneira vibratória ou equipamentos específicos para esta finalidade como o lavador de rosca, o classificador espiral e o ciclone.

Processos a úmido, apesar de serem já consagrados na área de tratamento de minérios, pela primeira vez em pesquisas nacionais estão sendo abordados como alternativa para a melhoria da qualidade de agregados reciclados.

A lavagem em atividades de mineração é realizada pelos seguintes processos (FAÇO, 1986):

- material graúdo: lavagem direta sobre peneiras vibratórias ou “scrubbers”, quando o teor de argila ou a plasticidade é alta;
- materiais de difícil desagregação podem ser tratados em equipamento do tipo “log washer” antes do peneiramento;
- materiais finos: em lavadores de rosca, classificadores espiral ou ciclones.

A lavagem em peneira é usada para remover materiais indesejáveis, principalmente argilas e partículas extremamente finas. Também é empregada para a remoção de materiais finos que possuem umidade tal que impeça um peneiramento via seca eficiente.

A lavagem em peneira é executada aplicando jatos de água sobre o material durante o peneiramento para remover as impurezas aderidas ao material. Para recuperar o material menor que 1 cm, é necessário usar um lavador de rosca para remover impurezas e o excesso de partículas finas (FAÇO, 1986).

Em geral, para lavagem em peneira usa-se uma pressão da água de 1 a 3 atm e um volume de água de 1 a 3 vezes o volume de material que está sendo peneirado, sendo de 1 a 1,5 vezes para materiais relativamente limpos e de 1,5 a 3 vezes para materiais contendo argila. Em FAÇO (1986), é possível encontrar um método para dimensionamento de lavagem em peneiras.

O classificador espiral é um equipamento simples e robusto, constituído de tanque, eixo, espirais e acionamento, utilizado para separações granulométricas na faixa de 75 a 150 µm. Possui maior eficiência de classificação que o ciclone e o lavador de rosca (CHAVES, 2002). Seu método de operação é o seguinte:

- a polpa escoar para a porção mais baixa do tanque classificador;

- as partículas mais grossas se acomodam no fundo do tanque e são levadas para cima pela rotação do espiral (“underflow”), sendo descarregado com uma porcentagem de sólidos entre 65% e 75% (CHAVES, 1996);
- o movimento das partículas acomodadas dentro do espiral também permite que as partículas finas aprisionadas escapem, juntando-se ao material não acomodado e ao líquido que escoam para a descarga (“overflow”) (FAÇO, 1986).

Algumas variáveis do processo devem ser limitadas. Por exemplo, a inclinação do classificador deve estar entre 10% e 20% (LUZ *et al.*, 1998) e a velocidade de rotação da rosca, para um diâmetro de espiral de 60 cm, deve estar entre 6 e 16 rpm (CHAVES, 1996).

A área do transbordo do “overflow” é outra variável que governa sua capacidade, podendo ser aumentada variando-se a inclinação das paredes laterais do tanque. Quanto maior esta área, maior a capacidade do equipamento em termos de vazão do “overflow” (CHAVES, 2002).

Variando a imersão da espiral no banho, varia a agitação induzida por ela no volume de polpa imediatamente junto à superfície do banho. Se a espiral estiver girando alguns centímetros abaixo da superfície do banho, esta superfície fica mais calma do que se a espiral estiver parcialmente emersa. Isto afeta a superfície do corte: com a espiral emersa, a agitação é forte e qualquer partícula que esteja por ali é lançada no “overflow”; com a espiral imersa, há um espaço entre a região agitada pela espiral e a superfície do equipamento. Neste espaço, a partícula pode encontrar seu verdadeiro caminho (“overflow” se leve e “underflow” se pesada) (CHAVES, 2002).

O tamanho do classificador é expresso pelo diâmetro da espiral, em polegadas, variando normalmente entre 24” e 86” (60 cm e 218 cm). A espiral é dotada de placas de desgaste e é presa ao eixo por braçadeiras dotadas de distanciadores. É possível usar de duas a três espirais ao redor do eixo ao invés de apenas uma, o que duplica ou triplica a capacidade de arraste de “underflow” pela rosca (CHAVES, 2002).

O eixo se apóia em sua parte inferior em um mancal submerso, que se constitui na peça de maior responsabilidade deste equipamento. Por trabalhar em condições extremamente desfavoráveis (ambiente imerso, cheio de areia e suportando todo o esforço do transporte do “underflow” calha acima), deve-se dedicar especial atenção a ele escolhendo uma boa solução de vedação (CHAVES, 2002).

Todos os classificadores possuem um sistema de elevação do eixo para prevenir que a espiral fique travada pelo minério sedimentado, em caso de parada de operação. Este sistema pode ser manual (rosca sem-fim), hidráulico ou motorizado (CHAVES, 2002).

Em geral, a drenagem do “underflow”, calha acima, é muito eficiente, fazendo com que ele saia com uma porcentagem de sólidos relativamente constante e regular (CHAVES, 2002).

Quando o equipamento está trabalhando em regime de classificação, a regulagem da operação é feita pelo controle da diluição da polpa dentro do classificador: quanto maior a porcentagem de sólidos, mais grosseiro é o corte.

Além disso, outros parâmetros influem no corte: aumentando a rotação da espiral (até um certo limite) ou a inclinação do aparelho, o corte tende a ficar mais grosseiro. Entretanto, quando ele trabalha em regime de corrente (alimentação bem mais diluída que no regime de classificação), o mecanismo é inverso: quanto menor a porcentagem de sólidos, mais grosso o corte (CHAVES, 2002). De acordo com LUZ *et al.* (1998), os classificadores espirais não trabalham com mais de 50% do peso em sólidos.

Os lavadores de rosca (Figura 28) também são usados para lavagem e drenagem de materiais finos que tenham um produto de tamanho menor que 1 mm. São especialmente projetados para cumprir os requisitos de agregados para concretos e argamassas, onde partículas extra-finas não são desejáveis. A lavagem é realizada pela injeção de água pressurizada e pelo movimento do material através da rosca. O tamanho das partículas a serem removidas pode ser ajustado pela variação de vazão de água (FAÇO, 1986).

Os lavadores de rosca são similares em aparência ao classificador espiral, mas operam segundo outro princípio. Eles são equipamentos que, através da

movimentação do material pelas rosca e da injeção de água (de lavagem) a alta pressão na extremidade inferior do tanque do equipamento (extremidade inundada), realizam a lavagem do material de interesse, retirando por “overflow” as partículas indesejáveis e certa quantidade de água. A regulagem do corte é feita variando a vazão de água de lavagem injetada. O “underflow” é desaguado, podendo chegar até a 75% de sólidos (CHAVES; PERES, 1999).



Figura 28: Lavador de rosca duplo, em utilização na extração de areia de Amparo/SP (foto do autor).

A lavagem do agregado em lavador de rosca envolve um consumo de água elevado, de 8 l/s (para equipamento de menor porte e remoção da fração menor que 75 μm) a 38 l/s (para equipamento de maior porte e remoção da fração menor que 0,15 mm) (FURLAN, 2003).

Nos processos via úmida, por questões econômicas e ambientais, torna-se necessário investir em um processo de reutilização da água.

Para isto, podem ser utilizados tanques de decantação (Figura 29), equipamentos como bacia de sedimentação com uso de floculadores ou de separação de sólidos por centrifugação.

Uma desvantagem de qualquer processo de lavagem é o aumento do custo da reciclagem, não somente pelo consumo de água, mas também porque este processo gera um resíduo (fração pulverulenta) que, se não for utilizado e nem tiver valor comercial, envolverá custos para remoção.



Figura 29: Exemplo de tanque de decantação utilizado na extração de areia de Amparo/SP (foto do autor).

Todavia, a necessidade de saturação prévia de agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de consistência plástica a fluída, somada à eliminação de frações contaminantes, são aspectos favoráveis ao uso desses processos em reciclagem de RCC.

As combinações de material leve com concreto ou tijolo e de gesso acartonado com concreto podem, em tese, ser separadas por jigagem. Entretanto, para a combinação tijolo/concreto, não é possível obter uma separação total dessas frações, mesmo em processos muito efetivos e controlados em laboratório (MULLER; WIENKE, 2004).

Mas, WEIMANN; MULLER (2004) testaram um outro processo a úmido, que incluía a remoção da matriz ligante, a remoção de finos < 0,10 mm por ciclone e a separação de densidade por jigue, e constataram que este processo pode melhorar as propriedades do material feito com finos de concreto britado, em comparação ao processo via seca.

2.9.9 Equipamentos e técnicas para redução da variabilidade do RCC

Existe ainda a possibilidade de se utilizar pilhas de homogeneização, como as utilizadas na produção de cimentos e minérios, em agregados reciclados, de forma a diminuir a variabilidade natural do produto ao longo do processo. Mas, no Brasil, ainda não foi analisada sua eficiência, muito embora tenha sido incentivado por pesquisas acadêmicas como a de ANGULO (2000).

Na mineração, as pilhas de homogeneização têm as funções de estocagem e redução das variáveis na alimentação do processo, tendo como objetivos (FERREIRA, 1989):

- racionalização e otimização das operações de lavra;
- menor custo operacional e produtos com melhor qualidade;
- usinas mais bem dimensionadas, dada a regularização do fluxo de material no sentido mina-usina conseguido pelo estoque existente nas pilhas;
- maiores recuperações do produto alimentado no processo, com a conseqüente diminuição dos custos finais;
- melhor atendimento a limites de tolerância mais estreitos , implicando em ganhos cumulativos nos estágios posteriores de processamento.

Para uma correta seleção dos equipamentos necessários à construção e retomada das pilhas, os seguintes aspectos devem ser analisados (FERREIRA, 1989):

- características do material: número de materiais distintos a serem empilhados, morfologia do depósito mineral, método de lavra, características físicas do material (densidade aparente, ângulo de repouso, distribuição granulométrica, características de fluxo, abrasividade, tendência à formação de poeira);
- necessidade de homogeneização: desvio-padrão admissível, necessidade ou não de diferentes tipos de processamento para os vários tipos de materiais existentes;
- outros requisitos de processo: faixas operacionais dos fluxos de empilhamento e retomada, capacidades de estoque (segundo SCHOFIELD (1980), adota-se um estoque que possa suprir por 7 dias a produção da usina), necessidade ou não de fluxos de retomada constantes, necessidade ou não de se evitar a degradação da distribuição granulométrica das partículas, necessidade de estoques abertos, necessidade de empilhamento e retomada simultâneos,

necessidade de empilhar/retomar continuamente, necessidade de acesso a algum estoque estratégico nas adjacências;

- implicações ambientais: direção do vento, condições de drenagem da água, necessidade de eliminação de poeira/barulho;
- restrições físicas da área: espaço para homogeneização, formato da área, topografia, condições do solo (recalques, compactação), direção dos fluxos de entrada/saída do material, necessidade de expansão;
- considerações gerais: facilidade de operação dos equipamentos, grau de automação desejável, custos de capital e operacional, complexidade mecânica, prazo requerido para construção e implantação.

Quanto maior o comprimento do pátio e, conseqüentemente, menor a largura das pilhas, mais baratos serão os “stackers” e os retomadores (FERREIRA, 1989).

Para a medida de eficiência da instalação de homogeneização é utilizado o fator de homogeneização, definido como o quociente entre o desvio-padrão do produto final da pilha e o desvio padrão do material alimentado na instalação (FERREIRA, 1989).

Em geral, as instalações de homogeneização são constituídas por pelo menos duas pilhas, uma em formação e outra sendo retomada. Existem vários arranjos de pilhas. A escolha por um deles depende da capacidade da pilha, dimensões ótimas sob o aspecto econômico, arranjo físico do sistema de correias e da possibilidade de ampliações (FERREIRA, 1989).

Quanto às pilhas circulares, o melhor método é o contínuo por dar melhor homogeneização. A maior desvantagem das pilhas circulares é a impossibilidade de ampliação da capacidade de instalação com a manutenção da folga estratégica planejada. Além disso, sua eficiência pode ser menor que a longitudinal. As maiores vantagens são: correias mais curtas, menor potência para os “stackers” e retomadores, menor custo de operação e manutenção e investimento, menor influência da direção do vento, flexibilidade no projeto de arranjo físico (FERREIRA, 1989).

SCHULZ (1993) recomenda homogeneizar a produção diária de agregado reciclado por pré-seleção, pilhas de estocagem, deslocamento e mistura, para que ele possa ser considerado uma unidade. Para avaliar a homogeneidade e obter dados para projeto de mistura, são recomendados testes rápidos, alternativas simples e parâmetros dependentes que são discutidos por SCHULZ (1986 e 1988) *apud* SCHULZ (1993).

No Brasil, desde ANGULO (2000) sugere-se a formação de pilhas de homogeneização em usinas de reciclagem. Essas pilhas são formadas homogeneizando-se o material reciclado e espalhando-o em camadas horizontais sobrepostas, garantindo-se assim que porções verticais retiradas dessas pilhas tenham composições aproximadamente iguais.

Porém, ele não chegou a avaliar o desempenho dessas pilhas para garantir a homogeneidade dos agregados e das argamassas e concretos produzidos. Também faltou verificar qual é o tempo necessário de formação das pilhas para que a técnica funcione e se há dificuldades operacionais e de espaço físico para garantir a eficiência dessa técnica para os agregados reciclados de RCC.

Apenas a classificação visual de RCC tem sido utilizada em algumas usinas brasileiras. Pode-se, por exemplo, reciclar separadamente a fração cerâmica de RCC da fração de concreto e utilizar estes materiais separados ou em proporções definidas. Esta prática é viável, principalmente, quando os resíduos são pré-selecionados na origem.

Em caso de RCC com composição mista, pode-se utilizar uma classificação visual na usina em função da predominância da cor, vermelha ou cinza, uma vez que a separação dessas frações na usina é uma tarefa dispendiosa e sua eficiência deve ser verificada e questionada ou para aplicações não estruturais, como no caso das argamassas estudadas nesta tese.

2.10 Especificações para o controle tecnológico de agregados reciclados

A tecnologia de reciclagem de RCC classe A deve prever o controle tecnológico do material produzido, da forma mais sistêmica e eficaz possível, inclusive, para minimizar e justificar a incidência do seu custo no valor final do

agregado. Esta é uma etapa ainda pouco explorada no Brasil e, infelizmente, não aplicada nas usinas brasileiras.

O controle tecnológico de agregados reciclados engloba a definição de lotes de caracterização e do método de amostragem, propriedades de controle (tanto do agregado, quanto dos produtos gerados) e intervalos de aceitação. No caso de um processo industrializado de produtos derivados, é aconselhável definir também um método de controle do seu processo de produção.

As propriedades de controle e os intervalos de aceitação devem ser definidos em função da utilização a ser feita dos agregados reciclados, uma vez que, para cada finalidade, existe uma especificação diferente e um conjunto de propriedades a serem controladas e comprovadas, conforme requisitos de especificações de normas ou outros documentos de referência.

Entretanto, nem mesmo para uma dada utilização, a especificação das propriedades e dos limites a serem respeitados deve ser consenso entre especialistas.

Abaixo estão algumas especificações de agregados reciclados publicadas por diversos órgãos normativos ou por pesquisadores de alguns países, sendo que a ênfase para aplicação em argamassas não estruturais é apenas encontrada em dois documentos analisados a seguir, a DIN 4226-100/02 e a prEN 13139/01, corroborando isto a contribuição inovadora do Programa Experimental desta tese nos capítulos 5 e 6.

2.10.1 Especificação brasileira – NBR 15116/04

No Brasil, as atividades de normatização de agregados reciclados são recentes e foram todas iniciadas após o início desta tese.

Em 2004, foi aprovada a NBR 15116/04 que especifica os requisitos para a utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

Primeiramente, esta norma dá as seguintes definições de agregados de resíduo de concreto (ARC) e agregados de resíduo misto (ARM):

- **ARC:** agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda de, no mínimo, 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas;
- **ARM:** agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda de menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

A NBR 15116/04 também dá os requisitos a serem atendidos pelos agregados reciclados destinados à pavimentação e à produção de concreto sem fim estrutural, conforme apresentado na Tabela 20 até a Tabela 22.

Tabela 20: Requisitos gerais para agregado reciclado destinado à pavimentação, conforme a NBR 15116/04.

Propriedades	Agregado reciclado de RCC classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Composição granulométrica	Não uniformidade e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		NBR 7181/84	
Dimensão máxima característica	≤ 63 mm		NBR NM 248/01	
Índice de forma	≤ 3	-	NBR 7809/83	-
Teor de material $< 0,42$ mm	Entre 10% e 40%		NBR 7181/84	
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características	2	Anexo A da Norma	Anexo B da Norma
	Materiais não minerais de características distintas	3		
Sulfatos	2		NBR 9917/87	

¹⁾ Para os efeitos desta norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Tabela 21: Requisitos específicos para agregado reciclado destinado à pavimentação, conforme à NBR 15116/04.

Aplicação	ISC ² (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	≤ 1,0	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	≤ 1,0	Intermediária
Material para execução de base de pavimento	≥ 60	≤ 0,5	Intermediária ou modificada

¹⁾ Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN), no período de projeto.

²⁾ ISC = Índice de Suporte Califórnia.

Tabela 22: Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concretos sem função estrutural, conforme a NBR 15116/04.

Propriedades	Agregado reciclado de RCC classe A				Normas de ensaios	
	ARC		ARM		Agregado graúdo	Agregado miúdo
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)	≥ 90	-	< 90	-	Anexo A da Norma	-
Absorção de água (%)	≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	NBR NM 53/02	NBR NM 30/00
Teor de material < 75 µm (%)	≤ 10	≤ 15	≤ 10	≤ 20	NBR NM 46/01	
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1		NBR 9917/87		
	Sulfatos	1				
Materiais não minerais ¹⁾	2				Anexo A da Norma	Anexo B da Norma
	Torrões de argila	2		NBR 7218/87		
Teor total máximo de contaminantes	3				-	

¹⁾ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos

Quanto aos procedimentos para controle de qualidade e caracterização do agregado reciclado, a NBR 15116/04 define o seguinte:

- os lotes de agregados reciclados devem ser formados segundo a classificação de resíduos classe A, ou seja, ARM ou ARC, para cada graduação granulométrica (brita corrida, brita zero, brita 1, areia, etc.) e deve compreender a produção dentro do período de um mês, considerando o volume máximo de 1500 m³ para cada lote, ou o que ocorrer primeiro;
- devem ser coletadas ao menos duas amostras por dia e por tipo de resíduo sólido (ARM e ARC). Cada amostra parcial deve conter cerca de 10 kg e deve ser coletada do material processado, de acordo com a NBR NM 26/00. Deve-se efetuar a coleta na base e na superfície da pilha de material;
- a amostra de campo é formada reunindo-se várias amostras parciais em número suficiente para os ensaios de laboratório. Cada lote deve ter uma amostra de campo formada por, no mínimo, 10 amostras parciais;
- a amostra de ensaio é obtida por redução da amostra de campo, conforme a NBR NM 27/00. A amostra de ensaio deve ser de, no mínimo, 60 kg;
- os ensaios devem ser realizados conforme definido na Tabela 23;
- um lote de agregado reciclado somente deve ser aceito quando cumprir todas as prescrições desta norma.

Tabela 23: Determinação do tipo e frequência de execução de ensaios para caracterização e controle de agregados reciclados, conforme a NBR 15116/04.

Propriedades	Método de ensaio	Frequência de ensaios	
		Concreto sem função estrutural	Camada de pavimento
Composição granulométrica	NBR 7181/84	Não se aplica	A cada lote
Teor de material < 75 µm	NBR NM 248/01	A cada lote	Não se aplica
	NBR NM 46/01	A cada lote	Não se aplica
Absorção de água	NBR NM 53/02	A cada lote	Não se aplica
	NBR NM 30/00		
Torrões de argila e materiais friáveis	NBR 7218/87	A cada lote	Não se aplica
Índice de forma (agregado graúdo)	NBR 7809/83	Não se aplica	A cada lote
Índice de suporte Califórnia e expansibilidade	NBR 9895/87	Não se aplica	A cada lote
Composição do agregado graúdo	Anexo A	A cada lote	
% de materiais não minerais no agregado miúdo	Anexo B	A cada lote	
Teor de cloretos	NBR 9917/87	Uma vez por mês ou 6000 m ³ 1	Não se aplica
Teor de sulfatos	NBR 9917/87	Uma vez por mês ou 6000 m ³ 1	
1 O que primeiro ocorrer			

Cabe fazer os seguintes comentários em relação ao definido na NBR 15116/04

para o preparo de concreto sem fim estrutural com agregados reciclados:

- o tamanho do lote é muito grande para usinas em fase inicial de produção e considerando ainda que a atividade de reciclagem de RCC no país é recente;
- os parâmetros físicos são facilmente atingidos. Ou seja, dificilmente um lote de agregado reciclado, miúdo ou graúdo, ARM ou ARC, será reprovado pelas suas características físicas. No entanto, não há qualquer orientação para análise de desempenho em caso do uso para concreto não estrutural, pois só há norma de aplicação em pavimentação;

- o teor de 2% admissível de materiais não minerais parece exagerado. Com um mínimo de controle de RCC em usina é possível atender a este valor. Mas, como exemplo, se em 1m³ de brita reciclada (ou areia reciclada) existir 2% em massa de papel (ou seja, cerca de 25 kg de um desses materiais ou, aproximadamente, 5128 folhas de papel ofício), o volume de impurezas é tal que, certamente, ou o concreto (ou a argamassa) produzido terá uma qualidade ruim, ou jamais esta brita (ou areia) conseguirá ser vendida;
- o processo de controle de qualidade estipulado não estimula o investimento em qualidade, pois não prevê a redução de ensaios com a melhoria do produto. É interessante permitir a redução do número de amostras ou o aumento do tamanho do lote à medida que certos parâmetros de qualidade fossem sendo atingidos;
- pelo volume de ensaios, é interessante financeiramente que a usina tenha um laboratório em campo;
- o teor de sulfatos e cloretos permissível parece ter sido baseado em especificações estrangeira, o que deveria ser revisto e adaptado para nosso país, principalmente, pelas diferenças de composição do cimento.

É interessante observar que esta norma não contempla o uso de areia reciclada em argamassas, o que evidencia a falta de experiência efetiva da comunidade técnica com o tema e, portanto, o ineditismo desta tese.

Sendo assim, considera-se que, futuramente, com a implantação de novas usinas no país e o aumento no consumo de agregado reciclado, esta norma seja revista, evoluindo nas suas especificações e procedimentos de controle de qualidade.

2.10.2 Especificações holandesas – Hendriks; Janssen (2001)

Na Holanda existe uma classificação de diversos tipos de agregados reciclados em função de sua composição e as possíveis aplicações de cada um destes tipos, que consta na Tabela 24. Além disso, tem-se também os requisitos de composição que cada tipo de agregado reciclado deve atender (Tabela 25).

Assim, de acordo com as especificações correntes na Holanda, agregados de concretos britados usados para a produção de novos concretos devem conter, ao menos, 80% de concreto britado com uma densidade maior que 2100 kg/m³. Ele não deve conter mais de 10% de outros materiais pétreos (HENDRIKS; JANSSEN, 2001¹).

HENDRIKS (2000) considera as seguintes propriedades importantes na aplicação em concretos: granulometria, densidade, retração e inchamento, resistência mecânica, à erosão e química, trabalhabilidade. As seguintes são consideradas pouco importantes: comportamento ao gelo, ação capilar e permeabilidade à água.

Em relação à presença de contaminantes, HENDRIKS (2000) cita alguns requisitos para agregados reciclados a serem utilizados em concretos, definidos pela norma holandesa NEN 5905 e que constam na Tabela 34.

Tabela 24: Área de uso dos agregados reciclados (HENDRIKS; JANSSEN, 2001²).

Uso	Tipo de agregado reciclado		
	RCA	RA	RMA BAG
Sub-base de estradas	+	+	+
Camada estabilizada	-	-	+
Aterro e preenchimento	-	-	-
Agregado para concreto magro	+	+	-
Mistura asfáltica	-	-	-
Agregado para concreto	+	+	+

RCA = agregado reciclado de concreto; RA = agregado reciclado misto; RMA = agregado reciclado de alvenaria; BAG = agregado contendo betume.

Tabela 25: Sumário dos requisitos de composição dos agregados reciclados (HENDRIKS; JANSSEN, 2001²).

	Componente principal	Outros componentes
Agregado reciclado de concreto	Mínimo de 80% de concreto britado com densidade seca > 2100 kg/m ³	Máximo de 10% de outros materiais minerais e máximo de 5% de asfalto
Agregado reciclado de alvenaria	Mínimo de 85% de material britado com densidade seca > 1600 kg/m ³	Máximo de 15% de outros materiais minerais e máximo de 10% de asfalto
Agregado reciclado misto	Mínimo de 50% de concreto britado com densidade seca > 2100 kg/m ³ e máximo de 50% de material britado com densidade seca > 1600 kg/m ³	Máximo de 10% de outros materiais minerais e máximo de 5% de asfalto

2.10.3 Especificação RESIBA

O programa RESIBA (Recycled Aggregates for Construction and Building, 1999-2002) teve como objetivo tornar o agregado reciclado de concreto um material competitivo para várias aplicações e foi dividido em 3 partes: declaração e controle da qualidade, projetos de demonstração e disseminação de resultados (MEHUS *et al.*, 2002).

A primeira parte objetivou propor um sistema de certificação com parâmetros e rotinas para o controle de qualidade daqueles agregados. O sistema proposto foi baseado num sistema utilizado para agregados naturais e no sistema de certificação holandês para RCA, em adição à normatização europeia geral. Ele inclui a seguinte documentação: rotina para recebimento de RCC de concreto e alvenaria, rotina para a produção de agregados reciclados de concreto e rotina para seus testes e documentação (MEHUS *et al.*, 2002).

Por este plano, o produtor deveria declarar as propriedades típicas do material, incluindo as variações aceitáveis e esperadas de suas propriedades para os vários produtos feitos de agregados reciclados de concreto.

O sistema de certificação proposto previu requisitos com relação aos métodos de ensaio e frequência mínima de testes. Os ensaios requeridos e a documentação mostrada na Tabela 26 separam as aplicações em base de estradas e concretos, como feito na norma brasileira atual.

Tabela 26: Propriedades, métodos e frequência de testes a serem realizados em gregados reciclados de concreto, conforme o Programa RESIBA (MEHUS *et al.*, 2002).

Propriedades a serem testadas	Métodos de ensaio	Tipo de laboratório	Frequência de ensaios e produção contínua	
			Concreto	Bases de pavimentos e trincheiras
Distribuição granulométrica	EN 993-1	L ¹	Uma vez por semana ou no mínimo a cada 2000 t	
Teor de finos < 63 µm (para materiais < 19 mm)	EN 993-1	L ¹	Uma vez por semana ou no mínimo a cada 2000 t.	
Teor de materiais < 20 µm (para materiais < 19 mm)	NPRA – 14434	L ¹	-	Quando requerido
Materiais constituintes	prEN 993-11	L ¹	Uma vez por semana ou no mínimo a cada 2000 t.	
Materiais orgânicos ⁵	EM 1744-1	L ¹	Uma vez por semana ou no mínimo a cada 3000 t.	-
Índice de forma (para materiais > 8 mm)	EN 993-3	L/C/E ²	Uma vez por mês	
Abrasão Los Angeles	EN 1097-2	L/C/E ²	-	15 em 15 dias ou 10000 t.
Densidade de massa	EN 1097-6	L/C/E ²	15 em 15 dias ou 10000 t.	
Absorção de água	EN 1097-6	L/C/E ²	15 em 15 dias ou 10000 t.	
Teor de cloreto ⁵	EN 1744-1	L/C/E ²	15 em 15 dias ou 10000 t.	Quando requerido
Compostos contendo enxofre	EN 1744-1	L/C/E ²	Quando requerido	Quando requerido
Análise química ⁴ (lixiviação)	EN 1744-3	A ³	-	15 em 15 dias ou 10000 t.

¹ Deve ser testado no local para permitir ajustes da produção de acordo com os resultados.

² Pode ser testado localmente, em central ou em laboratório externo.

³ Deve ser testado por uma terceira parte ou laboratório reconhecido.

⁴ Métodos alternativos podem ser aceites.

⁵ A frequência de teste pode ser reduzida por 50% se uma pré-avaliação da construção é realizada de acordo com a Publicação n. 26 (Norwegian Concrete Association, 1999).

Além disso, um sistema para classificação de agregados reciclados de concreto, baseado na composição do material e no uso (bases de pavimentos ou concretos), é também introduzido (Tabela 27) (MEHUS *et al.*, 2002).

Tabela 27: Classificação e especificações de agregados reciclados de concreto, pelo Programa RESIBA. Constituintes calculados como porcentagem de massa (MEHUS *et al.*, 2002).

	Tipo 1: Concreto britado		Tipo 2: Material misto	
	Uso: Concreto	Uso: Base	Uso: Concreto	Uso: Base
Material principal: Concreto britado e/ou agregado natural	> 94%		-	
Concreto e alvenaria britados e agregado natural	> 94%		> 90% ¹	
Outro material granular:	< 5%	< 5%	-	-
- Alvenaria britada	< 1%	< 5%	< 1%	< 5%
- Materiais não minerais: Madeira, papel, metais, materiais isolantes, orgânicos, plásticos, vidros, borracha, outros	< 1%		< 2,5%	
- Materiais isolantes	< 0,1 v.% ²	< 0,1 v.% ²	< 0,5 v.% ²	< 0,5 v.% ²
- Materiais orgânicos	< 0,1 v.% ²	< 0,1 v.% ²	< 0,5 v.% ²	< 0,5 v.% ²
Densidade de massa específica seca ³	> 2000 kg/m ³	> 2000 kg/m ³	> 1500 kg/m ³	> 1500 kg/m ³
Densidade de massa específica (saturada superfície seca) ³	> 2100 kg/m ³	> 2100 kg/m ³	> 1800 kg/m ³	> 1800 kg/m ³
Absorção de água	< 10%		< 20%	

¹ Para aplicações que exijam outras propriedades como requisitos, é recomendado manter a porcentagem de concreto e/ou agregado natural mínima de 80%.

² O teor de materiais orgânicos e isolantes deve ser calculado com base em volume.

³ A ser testado conforme a EN 1097-6. Ambos os critérios devem ser totalmente atendidos para pelo menos um dos dois.

2.10.4 Especificação alemã – DIN 4226-100/02

Na Alemanha, caso não haja outra especificação prioritária, os agregados reciclados devem apresentar propriedades físicas, químicas e geométricas conforme a DIN 4226-100/02.

Assim como o proposto pelo Programa RESIBA e pela Holanda, as especificações alemãs também classificam os agregados reciclados em função da natureza do RCC de origem (Tabela 28), a saber (DIN 4226-100/02):

- Tipo 1: reciclados de resíduos de concreto (“concrete rubble”);
- Tipo 2: reciclados de resíduos de demolição (“demolition debris”);
- Tipo 3: reciclados de resíduos de alvenaria (“brick rubble”);
- Tipo 4: reciclados de resíduos com revestimentos (“coated rubble”).

A composição de cada tipo de agregado reciclado deve atender às especificações da Tabela 28 abaixo (DIN 4226-100/02). Também especificações quanto à massa específica e à absorção devem ser atendidas, conforme apresentado na Tabela 29.

Tabela 28: Classificação de agregados reciclados em função de sua composição, conforme a norma alemã DIN 4226-100/02.

Constituintes	Constituição (% em massa)			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Concretos e agregados de acordo c/ DIN 4226-100/02	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Material cerâmico não poroso	≤ 10	≤ 30	≥ 80	≤ 5
Bloco sílico-calcário			≤ 5	
Outros constituintes minerais ¹	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asfalto	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Constituintes estranhos ²	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1

¹ Cerâmica porosa, concreto celular, concreto aerado, concreto sem finos, argamassa, escória, pedra pomes.
² Vidro, escória metálica não ferrosa, gesso, borracha, plástico, metal, madeira, papel, outros.

Para determinar a composição do RCC, os constituintes individuais devem ser separados manualmente e pesados, com amostras mínimas de 1000 g para agregados até 8 mm e de 2500 g para agregados maiores (DIN 4226-100/02).

Tabela 29: Densidade de massa específica e absorção de água após 10 minutos para agregados pétreos reciclados (DIN 4226-100/02).

Propriedade	Tipo de agregado reciclado			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Massa específica mínima (kg/m ³)	2000	2000	1800	1500
Tolerância admitida (kg/m ³)	± 150			Não exigido
Absorção de água máxima até 10 minutos (%)	10	15	20	Não exigido

Tabela 30: Frequências mínimas para caracterização geral dos agregados, conforme a DIN 4226-100/02.

Propriedade	Método de verificação	Frequências Mínimas		
		Tipos 1,2 e 3	Tipo 4	
Componentes	Visual	1 vez por dia	1 vez por dia	
Origem do material (controle de entrada)	Visual	Cada carga	Cada carga	
Distribuição granulométrica	DIN EN 933-1	1 vez por semana	1 vez por semana	
Forma dos componentes maiores	DIN EN 933-3 e 4	1 vez por semana	-	
Teor de finos	DIN EN 933-1	1 vez por semana	1 vez por semana	
Avaliação dos finos (se necessário para a tender a DIN 4226-1/01)	DIN EN 933-8 e 9	1 vez por semana	1 vez por semana	
Composição básica	Massa das partículas separadas visualmente	1 vez por dia	1 vez por semana	
Densidade de massa específica	DIN EN 1097-6	1 vez por semana	1 vez por mês	
Absorção de água	Anexo D da norma	1 vez por dia	-	
Cloretos solúveis em ácido	Anexo E da norma	2 vezes por ano	2 vezes por ano	
Teor de enxofre	-	2 vezes por ano	-	
Componentes orgânicos	-	Por órgão terceirizado, 1 vez por ano	-	
Compatibilidade com o meio ambiente	Anexo G da norma	2 vezes por ano	2 vezes por ano	

A frequência mínima de ensaios é dada na Tabela 30. Chama-se a atenção para a importância dada na determinação do teor de finos (1 vez por semana) e da absorção de água (1 vez por dia).

O teor de cloreto solúvel em ácido, em massa, não deve exceder 0,04% para agregados Tipo 1, 2 e 3 e 0,15% para agregados Tipo 4. Valores máximos de contaminantes químicos permitidos estão descritos na Tabela 31.

Tabela 31: Valores máximos de contaminantes químicos permitidos nos agregados reciclados, conforme a DIN 4226-100/02.

Característica	Valor máximo	Processo de análise
PH	12,5 ^a	DIN 38404-5
Condutibilidade elétrica	3000 µs/cm ^a	DIN EN 27888
Cloreto	150 mg/l	DIN 38405-1
Sulfato	600 mg/l	DIN 38405-5
Arsênio	50 µg/l	DIN EN ISO 11885 e 11969
Chumbo	100 µg/l	DIN 38406-6 e 16, DIN EN ISO 11885
Cádmio	5 µg/l	DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Cromo total	100 µg/l	DIN 38406-2 DIN EN ISO 11885
Cobre	200 µg/l	DIN 38406-7 e 16, DIN EN ISO 11885
Níquel	100 µg/l	DIN 38406-11 e 16, DIN EN ISO 11885
Mercurio	2 µg/l	DIN EN 1483
Zinco	400 µg/l	DIN 38406-8 e 16, DIN EN ISO 11885
Índice de fenol	100 µg/l	DIN 38409-16
Materiais carbonáticos	1000 mg/kg ^b	DIN 38409-18

^aCritério não excludente.

^bValores superiores, oriundos de partículas de asfalto, não são critérios excludentes.

2.10.5 Especificação europeia – prEN 13139/01

O projeto de norma europeu prEN 13139/01 especifica as propriedades dos agregados e fileres obtidos por processamento natural, manufaturado ou de material reciclado para uso em argamassas para assentamento de alvenaria, piso, revestimentos internos e externos, argamassas de reparo, grautes e materiais

especiais de assentamento. Por esta norma, finos são as partículas de agregado < 63 µm e filler é o agregado com a maioria dos grãos < 63 µm adicionado com o intuito de se obter ou melhorar certa propriedade. A Tabela 32 apresenta um resumo do teor máximo de finos < 63 µm, em massa, permitido em um agregado para uso em argamassas por essa norma.

Tabela 32: Teor de finos < 63 µm máximo admissível no agregado em função da aplicação, conforme a prEN 13138/01.

Dimensão máxima caract. do agregado (mm)	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
1				
2	3	5	8	30
4				

Categoria 1: argamassas de reparo, grautes, contrapiso e projetada;

Categoria 2: argamassas de revestimento interno e externo;

Categoria 3: argamassas de alvenaria (todos os agregados exceto rocha britada);

Categoria 4: argamassas de alvenaria com areia de brita.

De acordo com esta norma, a forma das partículas de agregados < 4 mm normalmente não é relevante no comportamento das argamassas. Para agregados > 4 mm, a forma deve ser determinada de acordo com a EN 933-3.

O teor total de enxofre deve ser < 1% da massa para agregados naturais. Se houver presença de pirrotita, uma forma instável de FeS, o teor máximo de enxofre deve ser de 0,1%.

A presença de materiais que alterem a pega ou a resistência mecânica das argamassas deve ser tal que não aumente o tempo de pega da argamassa por mais que 2h nem reduza a resistência à compressão aos 28 dias por mais que 20%.

A presença de materiais solúveis em água não deve ser superior a 1% em massa. O teor de íon cloreto solúvel em água deve ser menor que 0,15% para argamassas não armadas e 0,06% para argamassas armadas.

Também a frequência de testes de agregados para argamassas é definida nesta norma, conforme resumido na Tabela 33. Observa-se que as recomendações desta

norma são apenas em função do tempo e não do volume produzido, pois se tratam de ensaios de certificação e não de controle de produção.

Tabela 33: Frequência mínima de testes em agregados para argamassas, para laudos de certificação por terceiros.

Propriedade	Teste inicial	Método	Frequência mínima
Tamanho do agregado e curva granulométrica	X	EN 933-1	1 por semana
Teor de conchas	-	EN 933-7	1 por ano
Finos:			
- Teor e qualidade	X	EN 933-1	Quando necessário,
- Equivalente de areia	X	EN 933-8	1 por semana
- Azul de metileno	X	EN 933-9	
Densidade da partícula	X	EN 1097-6	Quando exigido e em caso de dúvida
Teor de cloreto, para agregado não marinho	X	EN 1744-1/98	1 a cada 2 anos
Teor de sulfatos	X	EN 1744-1/98	1 por ano e em caso de dúvida
Compostos contendo S	X	EN 1744-1/98	1 por ano e em caso de dúvida
Constituintes que alteram a pega ou o endurecimento:			
- NaOH	X		Em caso de dúvida:
- “Fulvo acid”	X		1 por semana
- Teste comparativo de resistência	X	EN 1744-1/98	
- Tempo de pega	X		
- Contaminantes orgânicos leves	X		Quando exigido para um uso particular
Matéria solúvel em água	X	EN 1744-1/98	Quando necessário, 1 por semana
Perda ao fogo	X	EN 1744-1/98	Quando necessário, 1 por semana
Resistência gelo-degelo	-	EN 1367-1 e 2	Quando exigido e em caso de dúvida
Reatividade álcali-sílica	-	-	Quando exigido e em caso de dúvida
Substância perigosas: radioatividade, metais pesados e carbonetos poliaromáticos	Somente quando especificado	-	Quando exigido e em caso de dúvida

No Brasil que possui usinas com diferenças muito grande de capacidade de produção, isto pode não ser o mais indicado. Além disso, para algumas propriedades a frequência de ensaios é muito pequena, o que talvez possa ser aplicado para países com um tempo maior de experiência em reciclagem, o que não é o caso do Brasil.

2.10.6 Outras considerações relativas a contaminantes mais comuns em agregados reciclados de RCC

Outros pesquisadores também especificam algumas propriedades como requisitos de qualidade do agregado reciclado para produção de concretos, quais sejam: densidade (SIMONS; HENDERIECKX, 1994), resistência e estabilidade dimensional (KIBERT, 1993), teor de argamassa aderida e absorção de água (KASAI, 1993, SCHULZ, 1993).

A Tabela 34 apresenta um resumo das especificações que puderam ser obtidas por diversos órgãos normativos e por pesquisadores internacionais. Um traço significa que aquele órgão não especifica um valor para tal propriedade ou que não foi possível descobrir este valor. Observa-se que apenas uma norma especifica o teor máximo de finos em agregados para argamassas, mas é a única que tem ênfase específica para esta aplicação.

Para se minimizar problemas com a presença de sulfatos em agregados reciclados, MOREL *et al.* (1993) recomendam o uso de cimentos com baixos teores de C₃A.

AGUIAR (2004) resumiu muito bem em sua dissertação as principais especificações nacionais e estrangeiras para a presença de sulfatos solúveis em agregados naturais e reciclados.

Tabela 34: Especificação de propriedades e de limites para uso de agregados reciclados em concretos ou argamassas por diversos órgãos e pesquisadores.

Propriedade	NBR 15116/04	NEN 5905/04	Hendriks; Janssen	RESIBA	DIN 4226- 100/02	prEN 13139/01
Teor de finos < 63 µm	-	-	-	-	-	< 5%
Cloretos	< 1%	< 1%	-	-	-	< 0,15%
Matéria solúvel em água	-	-	-	-	-	< 1%
Sulfatos	< 1%	< 1%	-	-	<600 mg/l	-
SO ₃ solúvel em ácido	-	-	-	-	-	< 1%
Ferro e vanádio	-	< 20%	-	-	-	-
Matéria orgânica	O total deve ser menor que	-	-	< 0,1%	-	-
Plásticos, papéis e borracha	que	-	-	< 1%	-	-
Madeira	< 3%	< 1%	< 10%	< 1%	-	-
Vidro		< 1%	< 1%	< 1%	-	-
Betume		< 1%	< 5%	< 1%	< 1%	-
Metal		< 1%	-	< 1%	-	-
Absorção	< 12%	-	-	< 10%	< 10%	-
Massa específica (kg/m ³)	-	-	-	> 2000	> 2000	-
Abrasão Los Angeles	-	< 40%	-	-	-	-
¹ Para argamassa de revestimento interno e externo						

A maioria dos limites informados na Tabela 35 se refere a agregados reciclados para concreto. Não se sabe se esses teores são coerentes para o caso do uso em argamassas não estruturais, em função da sua composição, níveis de porosidade e comportamento, que podem ser diferentes (AGUIAR, 2004).

Tabela 35: Limites de sulfatos para agregados em mistura com cimento Portland (AGUIAR, 2004).

País	Referência	Norma	Limite de sulfatos solúveis		Aplicação
			Valor	Forma de expressão	
França	AFNOR (1994)	NF P 18541	0,15% em massa de agregado	SO ₄	Agregados reciclados para concreto
França	RILEM (1994)	TC 121 DRG	1,0% em massa de agregado	SO ₃	Agregados reciclados para concreto
Alemanha	DIN (2002)	DIN 4226-100/02	600 mg/l	SO ₄	Agregados reciclados para concretos e argamassas
Japão	ASD (2004)	Specification 378	1,0% em massa de agregado	SO ₃	Substituição de 20% do agregado natural por reciclado, em concreto
Holanda	NEN(1990)	NEN 5936	1,0% em massa de agregado	SO ₃ *	Agregados reciclados
Itália	UNI (1999)	UNI 8520-2	0,20%	SO ₃	Agregados naturais
Brasil	IPT (1981)	IPT – ES – 5 (1981)	0,05% -		Agregado miúdo de argamassa de revestimento
Brasil	ABNT (2004)	NBR 15116/04	1,0% em massa de agregado	SO ₄	Agregados reciclados para concreto não estrutural

Segundo o Prof. Dr. Jörg Seele, os danos por sulfatos solúveis presentes em alvenarias afetadas por umidade podem ser avaliados pelos limites na Tabela 36 e foram assumidos e comprovados por AGUIAR (2004) e SHIROMA (2005) como critérios adequados para uma boa previsão.

Tabela 36: Níveis de contaminação e danos esperados para a ação de sulfatos, em materiais de construção, por critérios do IGS⁷. (SEELE *et al.*, 2004).

Sulfatos (% em massa)	Classificação e nível dos danos
< 0,024	Sem efeitos – Nível 0
< 0,077	Pequeno – Nível I
< 0,24	Médio – Nível II
< 0,77	Alto – Nível III
> 0,77	Muito alto – Nível IV

⁷ Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung (Instituto de Análise e Planejamento da Recuperação de Edificações Munique Ltda.), em Munique, Alemanha.

Infelizmente, no Brasil, apesar de existirem diversas usinas em operação, nenhuma delas possui, em sua rotina de produção, um procedimento de controle de qualidade dos agregados reciclados. O trabalho desta tese e de SEELE *et al.* (2004) poderão em muito contribuir par reverter esta situação e colocar os agregados reciclados sob melhor ótica e conceito pelo mercado consumidor.

2.11 Alternativas para o aumento e a melhoria da reciclagem de RCC

Para que a reciclagem do RCC realmente atinja uma proporção compatível com a sua geração um dos pontos necessários é que o processo de reciclagem não seja excessivamente complexo e/ou dispendioso. Para isto, é preciso fazer o uso de algumas técnicas capazes de melhorar a qualidade do resíduo gerado, nos próprios locais onde eles são gerados ou com um raio mínimo de deslocamento.

Na Itália, por exemplo, tem-se focado atenção não somente nas operações de reciclagem de RCC, mas também no controle de qualidade dos materiais que entram e saem da usina e nos custos de investimento e manutenção das usinas (BRESSI, 2003).

Com esta atitude é possível diminuir, senão eliminar, a idéia que o consumidor faz de que o material reciclado é de má qualidade.

Aliás, essa associação que o consumidor faz pode ser resolvida também através de uma maior divulgação dos produtos reciclados e de um desenvolvimento tecnológico adequado desses produtos, como é o caso da contribuição desta tese.

Como exemplo, podem ser desenvolvidos selos de qualidade ambiental dos produtos reciclados, algumas vezes chamados de “selo verde”, que garantam a qualidade do produto e que, ao mesmo tempo, podem ser utilizados como ferramenta de “marketing” pelas empresas.

Na Holanda, para influenciar a quantidade e qualidade do RCC, foram criados o Dumping Ban, BMD e Provincial Environmental Regulations (HENDRIKS, 2000). Com boa divulgação do produto reciclado e de sua qualidade, certamente o consumidor irá preferí-lo devido ao seu menor preço e impacto ambiental. Também existem os selos de garantia de qualidade BRL 2506 e Komo.

Além disso, naquele país, o alto grau de reuso pode ser garantido pela qualidade do processo de demolição e pela certificação da fase de processamento (National Assessment Guide) (HENDRIKS, 2000).

Os resíduos de construção civil tornam-se mais homogêneos, com menos impurezas e mais fácil de serem reciclados, se os processos de construção e de demolição passarem por um planejamento prévio. BAGLIONI; BONECCHI (1997) descrevem alguns critérios para projeto de construções com política de reciclagem de resíduos, relacionados à escolha do produto a ser utilizado nas construções:

- possibilidade técnica de reciclar com um consumo mínimo de energia e baixo nível de poluição;
- o mercado do material reciclado;
- o desempenho do material em funcionamento;
- a reciclagem do material secundário.

Para o resíduo de demolição, foram desenvolvidas técnicas de “demolição seletiva”, em que os materiais a serem reutilizados ou utilizados para reciclagem são retirados em etapas definidas de acordo com o tamanho, o processo construtivo e os materiais utilizados na edificação, sem que sejam misturados com os materiais a serem descartados. Desta forma, a qualidade do resíduo é muito superior à daquele gerado pelo processo de demolição comum, isto é, sem técnicas racionais (RUCH *et al.*, 1997a).

Em geral, a duração da demolição seletiva é de 50% a 200% maior do que o tempo de demolição normal. Porém, este período pode ser significativamente reduzido com a utilização de ferramentas computacionais, bases de dados na qual encontra-se detalhadamente a composição da construção (materiais, local na construção, volume, etc). Além disso, como em alguns casos estudados, o custo deste processo de demolição pode ser menor do que o da demolição normal devido à redução do custo da reciclagem e disposição dos materiais (RUCH *et al.*, 1997a).

A Figura 30 mostra a melhoria da qualidade do material reciclado obtido quando é utilizada a técnica do desmantelamento ao invés da demolição, para o caso de uma casa térrea.

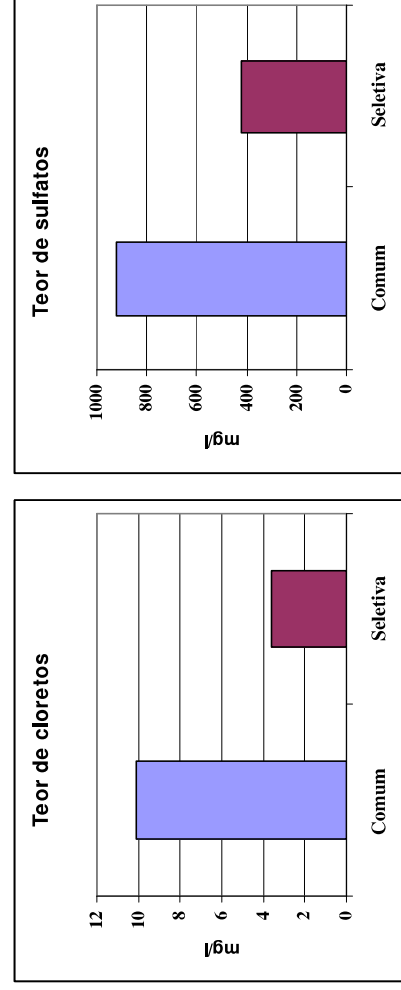


Figura 30: Comparação do teor de contaminantes presentes em amostras abaixo de 8 mm, nos casos de demolição por procedimento comum e demolição seletiva (RUCH *et al.*, 1997b).

Assim, diretrizes para demolição podem ser uma ferramenta poderosa para melhorar a qualidade do resíduo e para aumentar a sua fração reciclável. Entretanto, só serão efetivas se puderem existir em sinergia com outras iniciativas (SIMONS; HENDERIECKX, 1994).

Entretanto, deve-se ressaltar que algumas tecnologias construtivas dificultam ou simplesmente impedem a reciclagem de RCC, mesmo se forem utilizadas técnicas de demolição seletiva. Como exemplo, pode-se citar a aplicação de revestimento de gesso sobre alvenarias ou o uso de poliestireno expandido em lajes.

Para que a reciclagem do RCC possa evoluir, torna-se importante que as iniciativas não partam somente do setor privado ou do mercado. O governo também pode e deve ajudar a direcionar o mercado de RCC através de legislação e outras formas de regulamentação (KOEN *et al.*, 2001). Neste sentido, algumas regulamentações e modificações legislativas já ocorreram na França, em 1992 (BOILEAU *et al.*, 1997), em particular:

- a lei de 13.07.92, permitindo a partir de 2002 a aterragem de somente resíduos últimos;
- a EBTO (European Building Technique Observatory) impôs sobre todos os locais de construção uma seleção mínima de inertes e resíduos tóxicos.

Também o Demolition and Construction Wastes Landfill Ban é uma importante medida para promover o reuso dos resíduos. Ele proíbe o aterramento de RCC reutilizável (KOEN *et al.*, 2001).

O EcoBuild (1998-2002), programa de desenvolvimento iniciado para aumentar a eficiência das construções e da indústria da construção, tem sido importante no desenvolvimento da reciclagem na Noruega, além de fundar muitos programas de pesquisa relacionados ao RCC (MEHUS *et al.*, 2002).

SIMONS; HENDERIECKX (1994) apresentam algumas ferramentas a serem utilizadas para estimular a reciclagem:

- agregados reciclados devem ser utilizados com técnicas consolidadas em obras públicas, pois além de aumentarem o mercado, atraem a atenção de investidores privados;
- criação de uma marca oficial para produtos reciclados que seja uma garantia de boa qualidade do produto, com a intenção de tirar o medo do produto ser ruim;
- emissão de novas especificações para os trabalhos de demolição, de forma a obter maior quantidade e canalização de produtos recicláveis;
- criação de indústrias de reciclagem pelo setor privado, como forma de atividade econômica;
- necessidade de novas aplicações do material reciclado, onde devem ser dadas prioridades para atividades que utilizem grande quantidade deste material.

3 PANORAMA DA TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS

A tecnologia de argamassas de revestimento tem sido estudada no Brasil de forma muito abrangente e exaustiva através de pesquisas acadêmicas e tecnológicas, tendo isto resultado em incontável número de dissertações e teses e de artigos em congressos e revistas, por pesquisadores que se destacaram na área, sendo aqui preferível a omissão de citações, pois corre-se o risco de esquecer ou esquecer tantos que já colaboraram.

Desta forma, este capítulo irá apenas se restringir a uma visão geral sobre a tecnologia de argamassas de revestimento, em pontos que já são de consenso do meio técnico e outros de interesse e esclarecimento das premissas, variáveis e condições de contorno envolvidas nos capítulos subsequentes desta tese. Esses são relacionados a um programa experimental de desenvolvimento de um processo de produção e de controle de qualidade de argamassas de revestimento, com areias recicladas lavadas de resíduos classe A da construção civil.

3.1 Funções e camadas dos revestimentos de argamassas

Os revestimentos de argamassa objeto deste capítulo são aqueles que integram as vedações verticais dos edifícios, paredes internas e fachadas, e ainda as vedações horizontais em tetos das edificações.

Em geral, desempenham funções de regularização, acabamento e proteção dos substratos onde são aplicados, elementos de alvenarias e estruturas de concreto armado.

Os sistemas de revestimento podem se compor de duas camadas, quais sejam emboço e reboco, respectivamente camadas de regularização e acabamento, com espessuras e texturas diferenciadas segundo o acabamento final previsto. Podem ainda ser monocamada, com argamassa de espessura e composição especialmente controladas.

Os sistemas de emboço e reboco são em geral recomendados para revestimentos externos, mas hoje a racionalização e a redução de custos na

construção civil têm levado ao uso de sistemas de revestimento monocamada também em fachadas, sendo o desempenho e a durabilidade dos mesmos ainda bastante discutida e estudada pelo meio técnico.

3.2 Fatores influentes no desempenho inicial e durabilidade dos revestimentos

Consideradas as funções inerentes dos revestimentos, pode-se apontar que a durabilidade dos mesmos é um requisito crítico para o seu desempenho.

Assim, a durabilidade de revestimentos deve ser atestada pela qualidade da sua integridade e aderência inicial aos substratos onde são aplicados e, quando necessário, por ensaios de previsão de durabilidade, por métodos acelerados de envelhecimento.

A necessidade e a representatividade de estudos de desempenho de revestimentos devem ser estabelecidas em função do grau de inovação na composição da argamassa ou da técnica de execução de revestimentos, mas tendo-se em mente que há um conjunto de fatores influentes que são extrínsecos ao sistema de revestimento, conforme inicialmente resumido por SELMO (1989), a partir da norma inglesa BS 5262/1976, e hoje já amplamente discutido e endossado por muitos trabalhos acadêmicos que se sucederam e até pela NBR 13749/96.

A Figura 31 reúne este conjunto de fatores, para o caso de revestimentos de fachadas e que são em geral os mais críticos para a definição e especificação de argamassas.

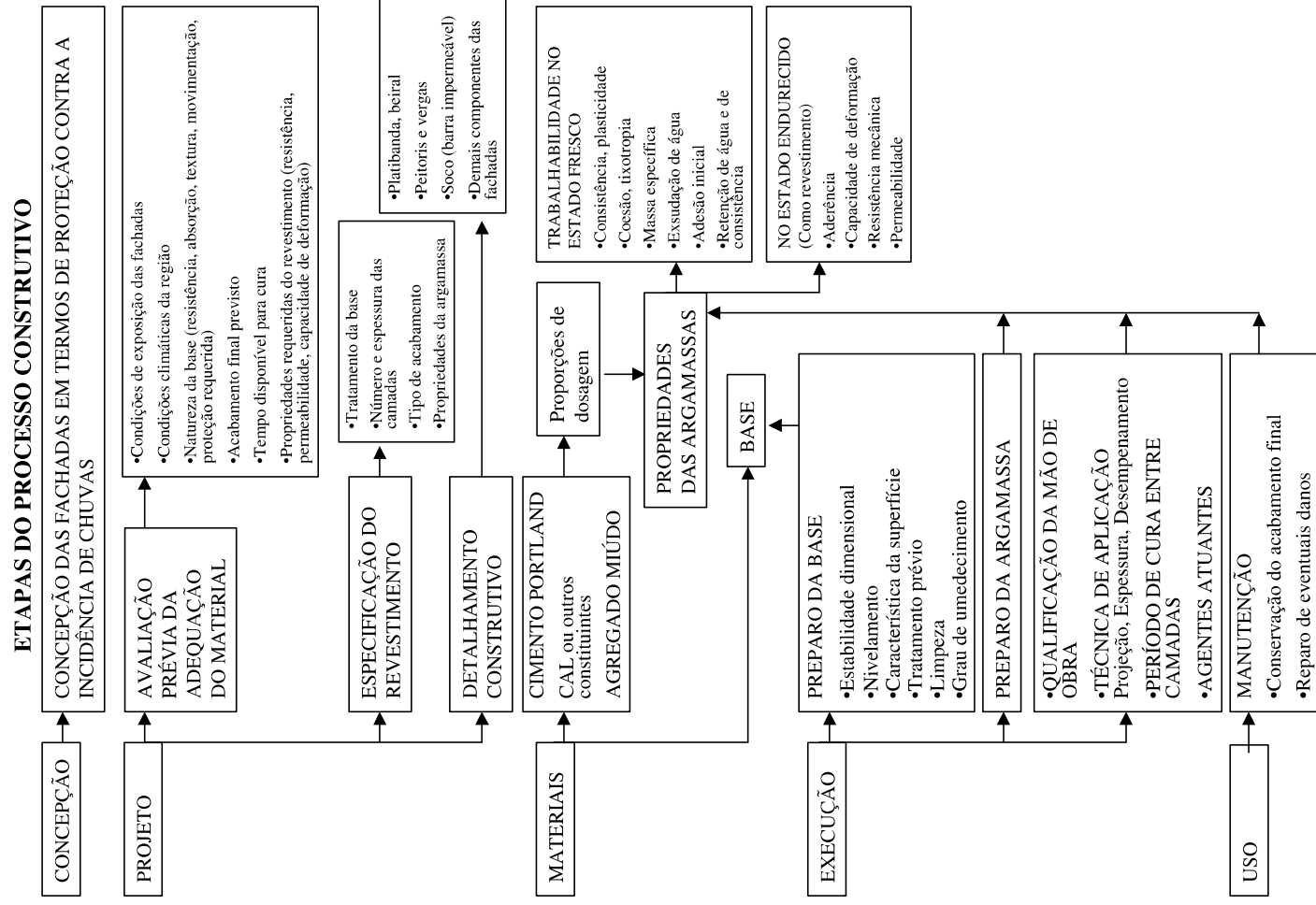


Figura 31: Fatores influentes no desempenho de revestimentos externos de fachadas, associados às diversas etapas do processo construtivo de edifícios (SELMO, 1989).

A Figura 32 apresenta um diagrama espinha-de-peixe, mais apropriado a controle de processo e resumido a partir da Figura 31, com uma síntese dos fatores influentes no desempenho de revestimentos externos de argamassa.

Mas, a efetiva durabilidade dos revestimentos de argamassa, em condições reais de exposição em fachadas, será muito dependente da manutenção do seu acabamento final, que deve ser também protetivo e constituído de um sistema próprio de hidrofugação, ou de pintura, ou de revestimento cerâmico, já que as argamassas de revestimento são materiais de elevada porosidade e vulneráveis às variações de temperatura e umidade ambiente.

Assim, a partir do momento em que uma falha importante ocorrer em algum dos fatores relacionados na Figura 32 e incidir sobre o revestimento, este poderá apresentar anomalias, seja feito de argamassas com areia natural, industrial ou reciclada.

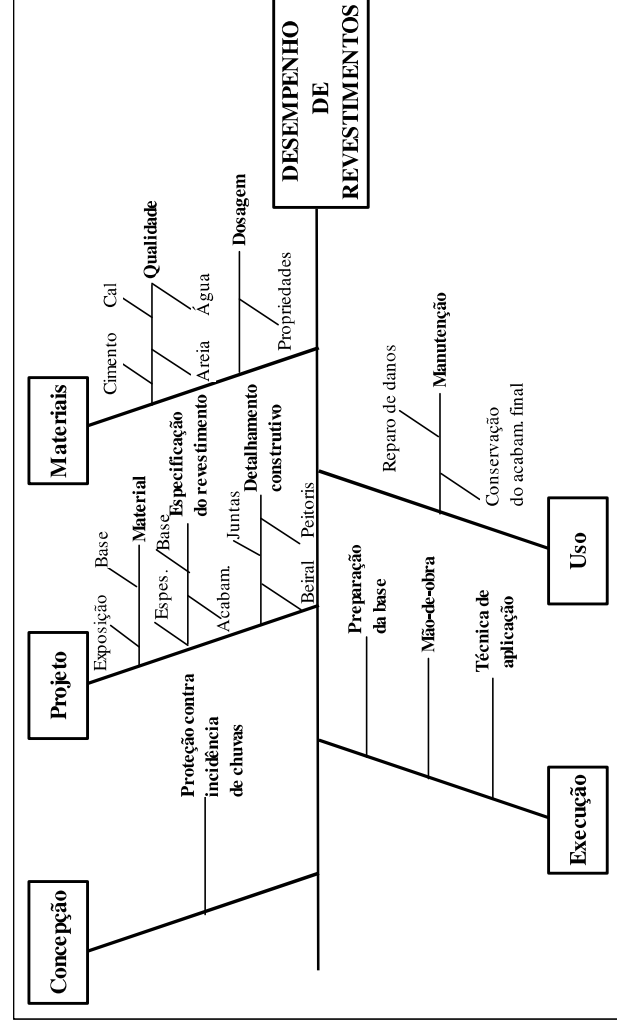


Figura 32: Condicionantes do processo construtivo que podem influir no desempenho de revestimentos externos de argamassa.

Todavia, os revestimentos de argamassas com areias recicladas exigem mais cuidados e critérios tanto para o controle de qualidade do agregado, quanto da composição das argamassas, pois apresentam algumas propriedades mais críticas

para a sua aplicação e o desempenho quanto à fissuração, como será visto neste capítulo e depois melhor evidenciado no programa experimental.

3.3 Anomalias mais freqüentes em revestimentos de argamassa de paredes e tetos

São bastante comuns inspeções prediais e perícias em revestimentos de argamassa, por ocorrência de anomalias. Os tipos de anomalias foram classificados no Brasil, por CINCOTTO (1983) e depois ainda mais discutidos em CINCOTTO *et al.* (1995).

Tabela 37: Anomalias em revestimentos de argamassa: possíveis causas e etapa de origem, no processo construtivo. CINCOTTO *et al.* (1995).

Manifestações	Aspectos observados	Causas prováveis atuando com ou sem simultaneidade	Origem segundo as decisões tomadas
Eflorescência	Manchas de umidade. Pó branco acumulado sobre a superfície	Umidade constante. Sais solúveis no componente da alvenaria. Sais solúveis na água de amassamento ou na umidade infiltrada. Cal não carbonatada.	Projeto do edifício. Especificação de materiais e componentes. Produção da argamassa. Execução em obra.
Bolor	Manchas esverdeadas ou escuras. Revestimento em desagregação	Umidade constante Área não exposta ao sol.	Projeto do edifício. Execução em obra.
Vesículas	Empolamento da pintura, apresentando-se as partes internas das ampolas na cor branca, preta ou vermelho acastanhado.	Hidratação retardada do CaO da cal. Presença de pirita, matéria orgânica ou concreções ferruginosas na areia.	Especificação de materiais. Produção da argamassa Execução em obra
	Bolhas contendo umidade no interior	Aplicação prematura de tinta impermeável Infiltração de umidade.	Execução em obra. Uso/Manutenção.
Descolamento com empolamento	A superfície do reboco descola do emboço formando bolhas, cujos diâmetros aumentam progressivamente. Reboco com som cavo sob percussão.	Hidratação retardada do óxido de magnésio da cal.	Especificação de materiais. Produção da argamassa.
	Descolamento em placas	A placa apresenta-se endurecida, quebrando com dificuldade. Som cavo sob percussão.	A superfície de contato com a camada inferior apresenta placas frequentes de mica. Argamassa muito rica em cimento
A placa apresenta-se endurecida, mas quebradiça desagregando-se facilmente. Som cavo sob percussão.		Espessura muito espessa da camada	
Descolamento em placas	A placa apresenta-se endurecida, mas quebradiça desagregando-se facilmente. Som cavo sob percussão.	Corrosão da armadura do concreto da base.	Especificação de materiais e componentes. Produção da argamassa. Execução em obra.
		A superfície da base é muito lisa. A superfície da base está impregnada com substância hidrófuga. Ausência de chapisco.	
Descolamento em placas	A placa apresenta-se endurecida, mas quebradiça desagregando-se facilmente. Som cavo sob percussão.	Argamassa magra. Ausência de camada de chapisco.	Especificação de materiais e componentes. Produção da argamassa. Execução em obra.

Tabela 38: Anomalias em revestimentos de argamassa: possíveis causas e etapa de origem, no processo construtivo. CINCOTTO *et al.* (1995).

Manifestações	Aspectos observados	Causas prováveis atuando com ou sem simultaneidade	Origem segundo as decisões tomadas
Descolamento com pulverulência	A película da tinta descola arrastando o reboco que se desagrega com facilidade. O reboco apresenta som cavo sob percussão. O revestimento desagrega-se com facilidade.	Excesso de finos no agregado Argamassa magra. Argamassa rica em cal. Ausência de carbonatação da cal. Argamassa de reboco em aplicada em espessura muito espessa.	Especificação de materiais. Produção da argamassa. Execução em obra.
Fissuras horizontais	Apresenta-se ao longo de toda a parede, com aberturas variáveis. Deslocamento do revestimento em placas com som cavo sob percussão.	Expansão da argamassa de assentamento por hidratação retardada do MgO da cal. Expansão da argamassa de assentamento por reação cimento-sulfatos, ou devida à presença de argilo-minerais expansivos no agregado.	Especificação de materiais. Produção da argamassa. Execução em obra.
Fissuras mapeadas	Distribuem-se por toda a superfície do revestimento em monocamada. Pode ocorrer descolamento do revestimento em placas, de fácil desagregação.	Retração da argamassa por excesso de finos de agregado, cimento como único aglomerante, água de amassamento.	Especificação de materiais. Produção da argamassa. Execução em obra.
Fissuras geométricas	Acompanham o contorno do componente da alvenaria.	Retração da argamassa de assentamento por excesso de cimento ou de finos no agregado. Movimentação higrotérmica do componente.	Projeto do edifício. Especificação de materiais. Produção da argamassa. Execução em obra.

Os defeitos mais usuais reclamados em ações judiciais são as manchas por eflorescências e as fissuras em revestimentos, ficando em seqüência de incidência a ocorrência de vesículas, de bolor e o descolamento de revestimentos, segundo levantamento acadêmico em mestrado tecnológico do IPT, analisado em SELMO (2002).

3.4 Materiais constituintes e sua influência nas propriedades das argamassas e revestimentos

Classicamente, as argamassas de revestimento são misturas homogêneas de aglomerante(s) inorgânicos, de origem mineral, agregados miúdos e água, podendo

conter aditivos ou adições, com propriedades adequadas ao fim a que se destinam, ou seja, para camadas de emboço, reboco ou ainda como chapisco, para aumento de aderência a substratos de porosidade extremas.

Os itens a seguir sintetizam e revisam as funções e influência dos materiais constituintes usuais, nas propriedades das argamassas e revestimentos.

3.4.1 Cimento portland

As propriedades resistentes da “pasta de cimento” dependem do tipo de cimento, da idade de hidratação, das condições ambientes de umidade e temperatura e da quantidade de água inicial usada na mistura, pois a água excedente além daquela que reage com os compostos anidros do cimento (cerca de 0,25 a 0,30 kg/kg) pode evaporar para o ambiente e deixar vazios ou poros, na pasta endurecida, causando a retração por secagem, característica de todos os materiais a base de cimentos Portland.

Nas argamassas de revestimento, as funções básicas do cimento Portland são promover a coesão dos agregados no estado fresco da mistura, sua adesão inicial à base de revestimento, promover o endurecimento, conferir resistência mecânica e reduzir a permeabilidade dos revestimentos à passagem de água líquida ou vapor, todavia podem aumentar a sua retração por secagem. A influência do cimento nessas propriedades é tanto maior, quanto maior o seu teor ou proporção no traço, isto é, no proporcionamento de dosagem, onde em geral é citado como aglomerante principal e com dosagem equivalente à unidade de massa ou volume.

Os cimentos portland para argamassas são, em geral, do tipo II, III, IV ou V, com classes de resistência igual a 25, 32 ou 40, sendo fabricados segundo as normas da ABNT, e há ainda outros tipos especiais.

A fabricação nacional do cimento Portland está hoje distribuída por cerca de 60 fábricas, de mais de dez grupos industriais, e o controle da qualidade é feito pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (www.abcp.org.br), que através de representantes coleta e ensaia amostras de cimento, provenientes de todas as fábricas brasileiras e oferece um Selo de Conformidade ABCP às marcas em circulação no mercado nacional. Também cada fábrica faz um controle diário dos

cimentos que fabrica. É assim um produto que pode ser dispensado de um controle adicional no processo de produção de argamassas, pois se trata de um material de construção com certificação de qualidade amplamente estabelecida no Brasil.

O tipo e a composição do cimento podem influenciar na retração. Cimentos de rápida hidratação (ou seja, cimentos com elevado teor de C_3A ou de alta resistência inicial) causam menor retração plástica, já que criam um esqueleto de cimento hidratado mais precoce, dificultando a exsudação (NEVILLE, 1997). Porém, BOLORINO; CINCOTTO (1997) observaram que painéis revestidos com as argamassas de cimento CP III não fissuraram, enquanto que os painéis revestidos com argamassas de cimento CP V ARI RS apresentaram fissuras, fenômeno justificado pela velocidade de hidratação acelerada e maior retração inicial, o que é contraditório à opinião de NEVILLE (1997).

O aumento do teor de cimento em argamassas eleva o potencial de retração da argamassa, sendo responsável pelo aumento da retração por hidratação, significativamente superior à variações dimensionais por efeitos de carbonatação (CINCOTTO, 1995).

Quanto à influência do cimento na aderência dos revestimentos, CARASEK *et al.* (2001) afirmam que, sem a ocorrência de excessos de fissuras, quanto mais fino o cimento, maior a resistência de aderência obtida.

3.4.2 Cal hidratada

As cales hidratadas em pó são aglomerantes de elevada finura e de baixa reatividade, pois em mistura com a água, formam uma pasta, que endurece por reações químicas de médio a longo prazos (30 a 90 dias ou mais), formando compostos de baixa resistência mecânica e que podem ser parcialmente dissolvidos por ação da água.

As cales hidratadas são chamadas de aglomerantes aéreos por não terem resistência à ação prolongada de água, por precisarem da presença de ar para a consolidação da sua microestrutura e das suas propriedades resistentes, que ocorre por reação de carbonatação.

As cales hidratadas são obtidas da calcinação de rochas calcárias, em processo industrial de elevada temperatura (cerca de 1000 °C), que produz cal virgem (óxidos de cálcio e magnésio). A cal virgem então é transformada em cal hidratada por processo de extinção com água controlada e estequiométrica (cal hidratada em pó) ou com água em excesso (cal em pasta). O processo de hidratação nem sempre pode garantir a extinção total do óxido de cálcio (CaO) e por isto é sempre recomendável misturar a cal com água e areia (argamassa intermediária) e deixar esta mistura em repouso por no mínimo 16 h antes da adição do cimento e emprego da argamassa.

Nas *argamassas mistas* de revestimento, as funções básicas e principais da cal hidratada são promover a trabalhabilidade da mistura fresca, aumentando a plasticidade, a retenção de água, a adesão e a extensão de aderência, sobre a base em revestimento, no ato da aplicação.

A influência da cal sobre a consistência e trabalhabilidade das argamassas provém das condições de coesão interna que a mesma proporciona, em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado (CINCOTTO, 1995).

As argamassas de cal apresentam características favoráveis de retenção de água pela elevada superfície específica da cal e pela grande capacidade de adsorção de seus cristais (até 100% do seu volume).

Quanto à natureza da cal, encontra-se na literatura melhores retenções de água com o emprego de cal dolomítica. Quanto ao teor, a retenção de água melhora com o aumento da relação cal/cimento.

Quanto maior a proporção e o consumo de cal, na argamassa, maior será a sua responsabilidade sobre a resistência mecânica final do revestimento, e a sua responsabilidade é integral, no caso de se tratar de uma argamassa simples de cal, para reboco, por exemplo.

As argamassas mistas com cal podem ter aderências mais duráveis do que as argamassas somente de cimento, devido à maior extensão de aderência e maior plasticidade. Além disso, o uso de cal aumenta a extensão de aderência devido à sua finura. Quanto ao tipo de cal, a cal dolomítica proporciona maior aderência que a cal cálcica, pelo maior tamanho dos cristais formados (CARASEK *et al.*, 2001).

O aumento no teor de cal e de pasta aumenta a retração da argamassa, principalmente, a segunda retração. A influência do teor de cal é explicada por BASTOS (2001) pelo fato de argamassas mais deformáveis e com menores espaços entre partículas manifestam com maior intensidade, sobre a retração, o efeito da depressão capilar por perda de água por evaporação, apesar do efeito de retenção de água da cal.

Assim, as propriedades reológicas e o endurecimento da pasta de cal nas argamassas de revestimento dependem do tipo de cal (composição química e finura), da forma de mistura com a água e a areia, da espessura da argamassa aplicada e das condições ambientais de umidade e temperatura, pois destas variáveis vai depender o processo de carbonatação.

A Tabela 39 resume a influência do teor de cal e do cimento, nas propriedades das argamassas.

Tabela 39: Influência do teor de cal e de cimento nas propriedades das argamassas.

Propriedade	Aumento da proporção de cal no aglomerante	Aumento da proporção de cimento em relação ao agregado
Trabalhabilidade	Cresce	Cresce
Retenção de água	Cresce	Cresce
Plasticidade	Cresce	Cresce
Retração por secagem livre	Cresce	Cresce
Extensão de aderência	Cresce	Decresce
Resistência de aderência à tração	Decresce	Cresce
Módulo de elasticidade	Cresce	Decresce
Resistência mecânica	Decresce	Cresce
Resistência à ação da água e impermeabilidade	Decresce	Cresce
Durabilidade	Depende do teor	Depende do teor

No Brasil, segundo a NBR 7175/92, a cal hidratada para argamassas pode ser:

- tipo CH - I, cal hidratada especial;
- tipo CH - II, cal hidratada comum (sem controle de óxidos não hidratados e a maioria dos fabricantes exige repouso prévio da cal hidratada);

- tipo CH - III, cal hidratada com carbonatos (sem controle de óxidos não hidratados, e a maioria dos fabricantes exige repouso prévio da cal hidratada).

Para as argamassas de revestimento, *simples* ou *mistas*, deve-se dar preferência às cales do tipo I ou tipo II, pois são mais puras, de maior finura e conduzirão a misturas mais econômicas. Mas, a maioria dos fabricantes produz cales tipo III (cal hidratada comum com carbonatos), sendo a sua densidade de massa aparente maior e o consumo nas argamassas também, para traços dosados em volume.

Experimentos do IPT, em 1991, patrocinados pelo CB-18/ABNT, mostraram perda efetiva de aderência de *reboco de argamassa simples de cal* tipo III em relação ao de cal tipo I ou II, pois no tipo III há adição de teor considerável de fíler calcário no produto (da ordem de 35%), que atua como “inerte” e não como aglomerante. Todavia, isto pode não ser um fator decisivo para o desempenho de rebocos, se houver um ajuste prévio do traço e análise efetiva da extensão de aderência, em função da base considerada.

A cal de má qualidade em geral baixa a resistência mecânica e pode causar fissuras nos revestimentos, pois não tem poder aglomerante similar ao da cal pura. O controle da qualidade de fabricação da cal hidratada no Brasil é hoje feito através Programa Setorial da Qualidade da Cal Hidratada para Construção Civil, criado em 1995, pelo PB PQ-H - Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat, do governo federal, e é patrocinado por fabricantes filiados à Associação Brasileira dos Produtores de Cal, conforme selo e marcas divulgadas no site www.abpc.org.br. Mas, o controle é realizado em todas as marcas disponíveis no mercado.

Periodicamente, são coletadas amostras em fábricas e nas revendas de materiais de construção, para testes no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo).

Participam do programa empresas associadas à ABPC e outras independentes, representando 83% da produção nacional da cal hidratada ou cerca de 2,5 milhões de toneladas/ano. O Programa tem como órgão gestor a auditoria independente da TESIS – Tecnologia de Sistemas em Engenharia Ltda.

Segundo informado no “site” da ABPC, o PSQ da Cal já conseguiu reduzir pela metade a adulteração de cales, no mercado, que em 1994, chegava a 40% de todo o volume fabricado no Brasil.

Assim, o uso de cal hidratada em argamassas de areia reciclada deve ser feito com cuidado e pré-seleção de marcas com selo de certificação pela ABPC, pois caso contrário, há riscos de efeitos nocivos ao desempenho dos revestimentos, pois em geral os materiais contaminantes de cales adulteradas são de elevada finura e aumentam o consumo de água das argamassas, baixam a resistência mecânica e podem aumentar as fissuras em revestimentos.

3.4.3 Agregados miúdos naturais ou industriais

O termo agregado miúdo tem origem na tecnologia de concreto, pois justamente conduz ao controle granulométrico até a dimensão de partícula de 75 μm .

Este limite granulométrico já era adotado em normas de argamassas na década de 80, conforme SELMO (1986), foi também aplicado em pesquisas sobre trabalhabilidade de argamassas, em SELMO (1989), e é ainda hoje adotado em especificações européias vigentes de agregados miúdos para argamassas.

Os agregados miúdos nas argamassas desempenham função econômica e técnica. A função econômica é porque os agregados são consumidos em grande quantidade nas argamassas de revestimento, em torno de 1,15 m^3 por m^2 de argamassa fresca, barateando o custo da mistura já que os aglomerantes usuais (cimento e cal hidratada), custam bem mais caro.

A função técnica existe, porque os agregados atuam como esqueleto rígido da argamassa, devendo minimizar a sua retração por secagem inicial (perda da água de amassamento excedente), e as movimentações subsequentes por ação eventual ou cíclica de água, pois esta torna a pasta volumetricamente instável no composto.

Também os agregados podem conferir aumento da resistência superficial e da resistência à abrasão dos revestimentos de argamassa, conforme a sua natureza mineralógica, densidade de massa específica, e a sua proporção no traço.

Uma vez que a natureza mineralógica influencia nas propriedades dos agregados, ela irá influenciar também em diversas propriedades de argamassas e concretos estruturais.

A granulometria dos agregados para argamassas deve ser preferencialmente contínua, o que conduz a uma melhor trabalhabilidade e a uma redução do volume de pasta e dos efeitos da retração por secagem dos revestimentos, como consequência do menor consumo de água nas argamassas (SELMO, 1986).

CARNEIRO (1999) comprovou que as argamassas dosadas a partir de distribuições granulométricas contínuas possuem melhores características no estado fresco e endurecido. Essa distribuição contínua pode ser conseguida através do termo geral do somatório de uma progressão geométrica. Ele afirma também que areias com elevada densidade de massa aparente⁸ produzem argamassas com maiores densidades de massa fresca, e que a distribuição granulométrica da fração de finos passantes na peneira de 0,15 mm ABNT é importante para a redução do consumo de água.

3.4.3.1 As especificações de agregados miúdos na década de 80

A normalização de agregados para argamassas de revestimento, como se pode constatar pelo documento de SELMO (1986) aqui resumido, sempre foi presente em países desenvolvidos e no Brasil, através de norma brasileira específica ou através de especificações do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

O agregado miúdo para a produção de argamassas devia ser, preferencialmente, de areia natural lavada de rio ou de cava, com formato o mais esférico possível e com predominância de grãos minerais entre 4,8 mm e 75 µm.

Hoje, são cada vez mais usadas areias industriais, também ditas areias artificiais, de britagem de rochas, mas podem possuir teor impróprio de materiais deletérios ou de partículas finas, porém têm a vantagem de poderem ser produzidas com controle de qualidade muito constante e isto é extremamente favorável à produção de argamassas. Equipamentos mais modernos já podem hoje controlar

melhor a forma das partículas e isto deve favorecer a expansão do seu consumo em argamassas.

Segundo SELMO (1986), a seleção do agregado miúdo devia ser baseada, a priori, na análise visual e em laudo de caracterização mineralógica do material, contendo:

- a forma dos grãos: sendo preferidos aqueles de formas arredondadas ou prismáticas, sem quantidade expressiva de partículas lamelares ou aciculares;
- a composição granulométrica: preferencialmente de tendência contínua e compatível com o tipo de argamassa e acabamento superficial previsto em cada camada do revestimento, como sugerido por especificações empíricas na Tabela 40. Como regra básica, para granulometria contínua, considerava-se que não devia haver mais de 50 % de agregado entre duas peneiras consecutivas da série normal ABNT e não mais que 25 % entre as peneiras ABNT de 0,15 mm e 0,30 mm. Uma forma de melhorar empiricamente a granulometria de agregado para argamassas era pela mistura de areia média com areia fina, em geral na proporção de 50%, e também tentar adotar as sugestões da Tabela 40, conforme o agregado que se apresentava;
- a composição mineralógica e a presença de impurezas ou materiais deletérios: os agregados precisam ser isentos de matéria orgânica, concreções ferruginosas, argilas ou outras impurezas, que comprometam o desempenho dos revestimentos, pois conforme os grãos sejam deletérios ou friáveis, podem causar os problemas relacionados na Tabela 37 e na Tabela 38. Os critérios então vigentes na década de 80, em algumas normas para a tolerância de contaminantes nos agregados para argamassas de revestimento, constam na Tabela 41.

⁸ Neste trabalho, o termo densidade de massa aparente será utilizado como equivalente ao termo massa unitária da NBR 7251/82.

Tabela 40 – Critérios granulométricos empíricos de documentos técnicos brasileiros, para agregados miúdos de argamassas de revestimento, da década de 80 (SELMO,1986).

Finalidade argamassa de revestimento	Dimensão máxima caract. dos grãos	Módulo de finura	% Retida acumulada, em massa			
			9,5 mm	4,8 mm	1,2 mm	0,15 mm
Chapisco	4,8 mm	> 3,0	≤ 5%	5 a 25%	-	≥ 90%
Emboço	2,4 mm	Entre 2,0 e 3,0	≤ 1%	5 a 15%	-	≥ 85%
Camada única	2,4 mm	≤ 2,5	0%	≤ 1%	≤ 5%	≥ 80%
Reboco	1,2 mm	≤ 2,0	0%	0%	≤ 5%	≥ 75%

Tabela 41 – Requisitos e critérios prescritivos, quanto à presença de materiais deletérios em agregados miúdos para argamassas de revestimento, reunidos em SELMO (1986).

Característica a determinar	Métodos de avaliação	Critérios	
<ul style="list-style-type: none"> Grãos deletérios de impurezas inorgânicas 	<ul style="list-style-type: none"> Teor de materiais pulverulentos 	<ul style="list-style-type: none"> ≤ 5 % ≤ 5 % ≤ 3 % ≤ 5 %, emboço e chapisco; ≤ 8 % reboco 	
	<ul style="list-style-type: none"> Teor de Argila em torrões 	<ul style="list-style-type: none"> NBR 7219 BS 812 ASTM C 117 IPT ES-5 	<ul style="list-style-type: none"> ≤ 1%
	<ul style="list-style-type: none"> Argilo-minerais expansivos Micas Sulfetos 	<ul style="list-style-type: none"> Apreciação petrográfica e microscópica 	<ul style="list-style-type: none"> Ausência
	<ul style="list-style-type: none"> Insolúveis Solúveis* 	<ul style="list-style-type: none"> IPT ME-11 IPT ME-12 IPT ME-13 DTU 26.1 	<ul style="list-style-type: none"> Teor desprezível Ausência ≤ 0,20% ≤ 0,05% ≤ 0,01% ≤ 1 %
<ul style="list-style-type: none"> Impurezas orgânicas 	<ul style="list-style-type: none"> Em decomposição 	<ul style="list-style-type: none"> NBR 7229 	<ul style="list-style-type: none"> ≤ 300 ppm
	<ul style="list-style-type: none"> Materiais carbonosos 	<ul style="list-style-type: none"> ASTM C 123 	<ul style="list-style-type: none"> Teor desprezível

(*) Exigência, em particular, para as areias procedentes de regiões litorâneas ou com origem suscetível a contaminação por sais solúveis.

Do ponto de vista ambiental e de controle de qualidade, as areias mais apropriadas para a produção de argamassas são hoje as areias industriais, porém o seu uso deve ser majoritariamente direcionado às aplicações estruturais, às indústrias de argamassas industrializadas e às argamassas dosadas em central, na medida em

que as indústrias geradoras ou usuárias desses resíduos invistam em máquinas e controle de processo, para a superação de algumas dificuldades técnicas específicas como as relativas ao elevado teor de finos e ao formato das partículas, que é mais crítico para o caso particular de revestimentos de argamassa.

A Tabela 42 abaixo mostra os limites de percentagem passante acumulada para areias de argamassas definidas por várias normas, reunidas de SELMO (1986) e CARNEIRO (1999).

Tabela 42: Limites de percentagem passante acumulada para areias de argamassas definidas por várias normas, na década de 80.

Tamanho (mm)	Porcentagem passante (em massa)			
	BS 5262/76	BS 1200/76	ASTM C144	DTU 26.1/78 ^b
6,30	100	100	100	100
4,75	100	98-100	100	100
2,36	100	90-100	95-100	94
1,18	100	70-100	70-100	76
0,60	80	40-100	40-75	59
0,30	40	5-70	10-35	42
0,15	10	0-15	2-15	25
0,075	5	0-5 ^a	0	15

^a Limite superior de 12% para pedra britada.

^b Distribuição granulométrica da argamassa.

A Tabela 43 abaixo resume as principais influências das características dos agregados nas propriedades das argamassas (SABBATINI, 1986).

Tabela 43: Influência das características dos agregados nas propriedades das argamassas (SABBATINI, 1986).

Propriedades	Características do agregado		
	Quanto menor o módulo de finura	Quanto mais descontínua a granulometria	Quanto maior o teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Retração por secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistência mecânica	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variable

CARASEK *et al.* (2001) resume da seguinte forma a influência do agregado na aderência dos revestimentos:

- com o aumento do teor de agregado diminui-se a resistência de aderência. Por outro lado, é ele que garante a durabilidade da aderência pela redução da retração;
- areias muito grossas diminuem a resistência de aderência pela perda de trabalhabilidade e extensão de aderência. Entretanto, entre as granulometrias trabaláveis, aquela de grãos mais grossos produz maiores aderências. Agregados com elevados teores de finos reduzem a aderência;
- grãos lamelares aumentam a resistência de aderência ao cisalhamento, pois aumentam o coeficiente de atrito da interface.

Mas, apenas a distribuição granulométrica não é o suficiente para classificar a qualidade de uma areia. Em adicional, tem-se a forma da curva, área superficial, características dos finos e tamanho médio das partículas (GLENCROSS-GRANT, 2003).

Como bem apontado desde SANTOS (1966), os finos < 75 µm inertes do agregado diminuem o teor de cimento da pasta que será absorvida pelo substrato, diminuindo assim a resistência.

Aliás, SELMO; BÜCHER (1990), baseados no trabalho de UNIKOWSKI (1982), comprovaram que a trabalhabilidade e a retração de argamassas com agregados de saibro podem ser correlacionadas de forma satisfatória com o teor total de finos < 75 µm das argamassas, desde que esteja também fixada a natureza dos finos, como mostrado na Figura 33.

Este estudo, na época, decorreu da proposta de SELMO (1989) para que o teor de finos totais em argamassas passasse a ser considerado um parâmetro de controle de trabalhabilidade e de retração das argamassas, tendo em vista a classificação de plasticidade de LAUHERTA; MONTERDE (1984), adiante discutida.

Como não se dispõe comercialmente de areia com granulometria controlada pelos fornecedores, nem nos grandes mercados, o controle da natureza e do teor de finos < 75 µm talvez seja o parâmetro mais adequado à realidade do mercado nacional, além de poder ser determinado por diversas técnicas laboratoriais e de campo.

Trabalhos posteriores foram conduzidos em outras universidades brasileiras, confirmando a influência desse critério na retração de argamassas e fissuração de revestimentos.

Na interpretação de CARASEK *et al.* (2001), duas hipóteses podem explicar esse efeito: os finos ocupam os poros do substrato tomando o lugar dos produtos hidratados de cimento; os finos diminuem o raio médio dos poros da argamassa, prejudicando o fluxo de pasta aglomerante. Isto porque quando o raio médio dos capilares da argamassa é maior que o do substrato, a água flui da argamassa para o substrato. Quando o tamanho inverte, o fluxo de água também inverte.

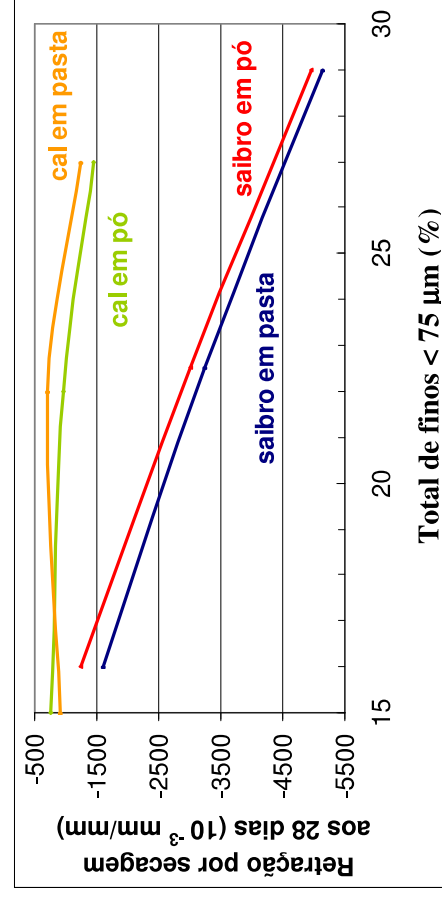


Figura 33: Retração por secagem aos 28 dias das barras de argamassas preparadas com os plastificantes em pó, em função do teor total de finos < 75 µm, sendo a cura em câmara seca a 50% ± 4% U.R e o consumo médio de cimento igual a 144 kg/m³. (SELMO; BUCHER, 1990).

3.4.3.2 A especificação europeia atual de agregados miúdos para argamassas

Este item será discutido tendo por base a última versão revisada do projeto europeu de agregados para argamassas, o prEN 13139 – Final Draft – November 2001, depois logo aprovado, mas em versão não disponível.

Esse documento trata de agregados com densidade normal, acima de 2000 kg/m³, e inicialmente classifica os agregados em três categorias:

- “Fine aggregate” ou agregado miúdo: com dimensão de partícula inferior a 4 mm;
- “Filler aggregate” ou agregado filerizado: com 100% de partículas inferiores a 2 mm, 85% a 100% abaixo de 0,125 mm, podendo ter ainda de 70% a 100% de grãos abaixo de 63 µm;
- “Fines” ou finos: partículas com dimensão inferior a 63 µm.

Logo o critério para a classificação de partículas dos agregados como finos plastificantes está muito próximo ao proposto por SELMO (1989), com diferença de 12 µm. As tolerâncias no teor de finos para os agregados de argamassas de revestimento são de teor menor ou igual a 5%, em massa, independente do tipo de agregado (natural, industrial ou reciclado). As tolerâncias para argamassas de assentamento variam de 8% (areias naturais e recicladas) até 30%, para areias industriais.

A classificação granulométrica dos agregados é prevista em seis faixas granulométricas, sendo duas para cada tipo de areia (fina, média e grossa) e assim designadas: 0/1 mm; 0/2 mm; 0/4 mm; 0/8 mm; 2/4 mm; 2/8 mm.

O limite superior de cada faixa (D) deve ser de 1 até 15 % em massa das partículas, com nenhuma superior a 2D. O limite inferior (d) deve representar de 0% até 20% em massa das partículas, e a dimensão abaixo de 0,5d não deve representar mais do que 5%.

As seguintes tolerâncias na variação granulométrica são admitidas para até 90 % de 20 amostras mais recentes:

- ± 5 % para peneiras equivalentes a D;

- $\pm 10\%$ até $\pm 25\%$ para peneiras entre D e 0,25 mm;
- $\pm 2\%$ até $\pm 5\%$ para finos $< 63\ \mu\text{m}$.

Os limites estabelecidos para os principais contaminantes já foram apresentados no item 2.10.5.

Assim, as propriedades físicas de agregados reciclados para argamassas pela norma européia atual não são impostas, nem por faixas de densidade, nem por faixas de absorção de água, mas por critérios baseados no controle de retração (teor de finos) e na ação deletéria de contaminantes.

Também observa-se que as dificuldades no controle do teor de sulfatos solúveis em água estão superadas pela especificação do limite de sulfatos solúveis em ácido (SO_3).

Assim, em relação à norma brasileira atual de agregados reciclados para concretos não estruturais, essa norma é bem mais exigente quanto aos limites de sulfatos e de teor de finos ou materiais pulverulentos no agregado reciclado.

O controle de qualidade é definido por frequências mínimas variadas de tempo em função da importância de cada requisito ou suspeita de alteração e não por formação de lotes em volumes fixos.

A especificação européia contempla ainda ensaios de previsão de durabilidade dos agregados miúdos, mas os métodos e critérios não se aplicam ao Brasil, pelas diferenças climáticas. Então, no caso do Brasil, é recomendável a adoção de ensaios acelerados mais apropriados ao clima local, com a adoção de ciclagens moderadas à umidade e temperatura, como as estudadas por AGUIAR (2004), para a avaliação da suscetibilidade à eflorescências de areias recicladas contaminadas por gesso de construção.

3.4.4 Água de amassamento

A água de amassamento das argamassas dosadas em obra ou industrializadas deverá ser potável e de preferência, da rede de abastecimento público.

Recomenda-se a análise química em águas de açudes ou de poços artesanais, pela primeira vez em uso ou por análise periódica, conforme as condições locais de extração.

3.4.5 Aditivos, adições e outros materiais alternativos

Os aditivos e adições são materiais que podem ser usados em argamassas, para modificar uma ou mais de suas propriedades. São tipicamente usados nas argamassas industrializadas ou dosadas em central, sendo pouco recomendado o seu emprego para argamassas dosadas em obra, se não houver um tecnologista responsável pela sua análise e dosagem nas argamassas.

A maioria dos aditivos e adições não é normalizada, e o mercado dispõe tanto de produtos eficazes, quanto de produtos que podem prejudicar o desempenho das argamassas e revestimentos, principalmente, se usados sem princípios tecnológicos de dosagem.

No caso particular do uso de agregados sem controle de distribuição granulométrica, o uso de aditivos pode ser até mesmo inviável, pois em geral há reflexos conjuntos de alteração das propriedades das argamassas, desde o estado fresco.

3.5 Classificações, normas e considerações sobre especificações e desempenho de argamassas de revestimento de paredes e tetos

3.5.1 Quanto à forma de produção

3.5.1.1 Argamassas industrializadas

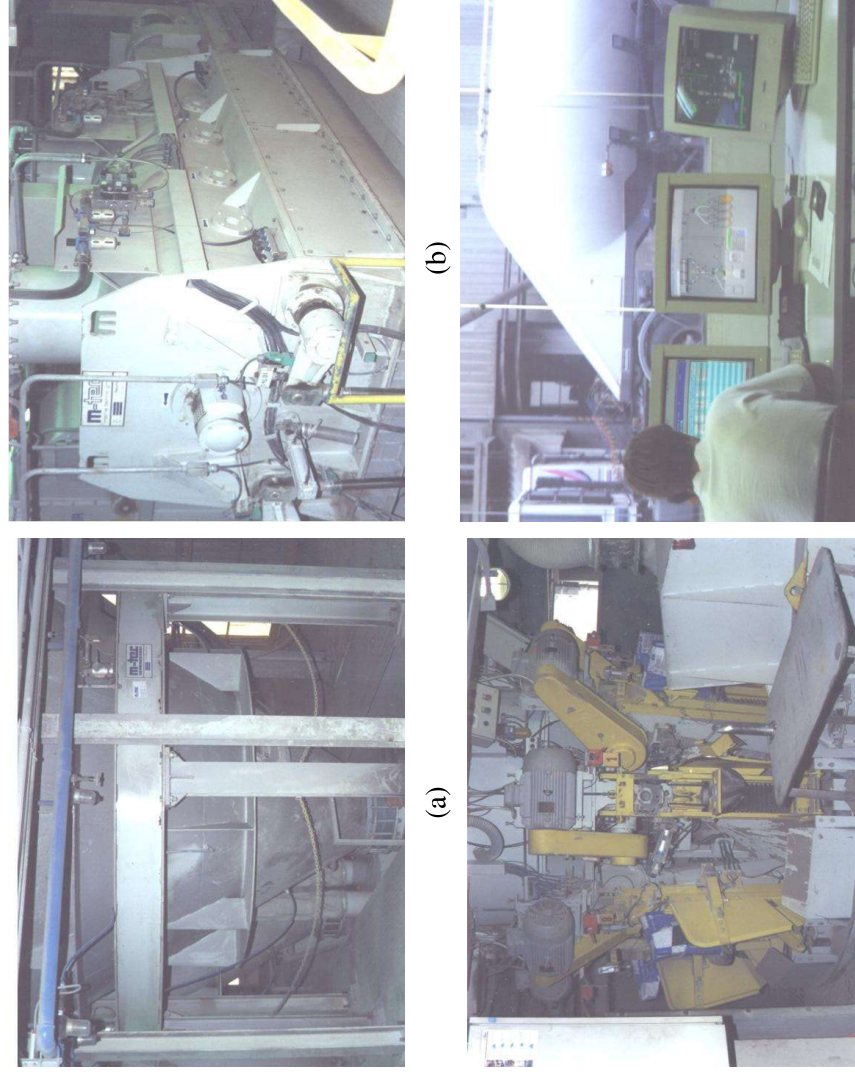
No início da década de 1950, as argamassas industrializadas foram introduzidas em países do continente europeu e norte-americano, a partir do conceito de fixação dos componentes e com a realização de misturas parciais ou totais em instalações industriais, não ficando mais a encargo do pedreiro a sua preparação. Estas argamassas são produzidas em centrais dosadoras, isentas de umidade (secas), armazenadas em silos ou ensacadas, de forma que seu manuseio seja restrito à obra de destino (MARTINS NETO; DJANIKIAN, 1999).

Nos anos 90, disseminou-se no Brasil o uso de argamassas industrializadas de múltiplo uso nos serviços de alvenarias e revestimentos de grandes edifícios, tanto pelos investimentos da indústria cimenteira para ofertar esses produtos, quanto pela evolução das metas de racionalização da construção civil (SELMO *et al.*, 2002).

Em dezembro de 2004 existiam, pelo menos, 5 grandes fabricantes de argamassa industrializada no Brasil (Quartzolit, Votomassa, Qualimassa, Cimpor e Ciplan) que, juntos, somavam 14 fábricas com uma capacidade de produção total instalada de 501.000 t/mês. O processo de produção adotado por algumas dessas empresas inclui as seguintes fases (NAKAKURA, 2003):

- a) tratamento e classificação dos agregados: o agregado utilizado, normalmente areia natural quartzosa ou artificial calcária, passa por cominuição na mineradora ou na fábrica de argamassa, através de britagem e moagem até que o agregado fique com uma dimensão máxima de 2,4 mm. Então, o agregado é levado para secadores rotativos ou de leito semifluidizado, peneirado e armazenado em silos;
 - b) dosagem e mistura (Figura 34 a e b): o processo de mistura é feito por batelada, em um misturador de eixo horizontal, cuja dosagem segue uma formulação pré-estabelecida. O sistema de pesagem e controle das formulações é feito por um computador que contém as informações sobre dosagem de cada constituinte;
 - c) ensacamento e despacho (Figura 34 c): realizado através de ensacadeiras automáticas de grande capacidade que, após encher e lacrar o saco, o despeja em um transportador horizontal para armazenamento em paletes;
 - d) controle e automação (Figura 34 d): um sistema controla todas as fases de produção: partida, pesagem e parada de equipamentos. Na memória central ficam as lógicas do processo e as formulações das argamassas.
- Entretanto, apesar de toda essa capacidade de produção e investimento, a participação das argamassas industrializadas no mercado ainda é modesta quando comparada à argamassa produzida em obra.

De acordo com as estimativas de NAKAKURA (2003), levantadas a partir da produção de cimento no Brasil em 2001 (38.264.000 t), da porcentagem deste cimento que foi para a produção de argamassas de todos os tipos no Brasil (13.101.500 t) e da porcentagem que foi para a produção de argamassas industrializadas (193.000 t), apenas 1,5% do total de argamassa consumida no Brasil foi produzida por processo industrial (cerca de 1.286.000 t por ano, para um consumo de cimento de 15%).



(c) (d)
Figura 34: Exemplo de processo de produção de argamassa industrializada. a) Dosagem. b) Mistura. c) Controle e automação. d) Ensaçamento.

De fato, o uso de argamassas industrializadas apresenta algumas vantagens em relação à tradicional, como resumido na Tabela 44. Mas, analisando esta tabela, percebe-se que existe a tendência de ressaltar as possíveis falhas do processo

tradicional e as vantagens do processo industrializado, uma vez que nem todos os itens ocorrem obrigatoriamente em todas as obras.

Como exemplo, é possível, no processo tradicional, evitar o peneiramento da areia e sua perda, como também fixar a maioria dos fornecedores de insumos.

Quanto ao processo industrializado, o aumento de produtividade nem sempre cobre o maior custo do produto, devendo ser avaliado caso a caso.

Tabela 44: Vantagens de argamassa industrializada em relação à tradicional (REGATIERI, 2002).

Convencional	Industrializada
Peneiramento Perda de areia Falta de controle granulométrico Geração de entulhos / perdas Produção no canteiro (cimento, cal e areia) Maior consumo de mão-de-obra Irregularidades na proporção de mistura Vários fornecedores de insumos Chuvas dificultam o fornecimento	Dispensa o peneiramento Rapidez no processo executivo Menor incidência de fissuras Menor geração de entulho / perdas Facilidade e rapidez no preparo Menor consumo de mão-de-obra Proporção de mistura uniforme Único fornecedor a qualquer tempo Argamassa “puxa” no tempo ideal

Considera-se então que as principais vantagens de se utilizar argamassas industrializadas é a maior facilidade de preparo e de transporte dentro da obra (podendo em alguns casos resultar na diminuição de mão-de-obra ou aumento de produtividade) e a possibilidade de se ter um produto com garantias técnicas e de uniformidade de desempenho.

Aliás, nem mesmo com todo o controle aplicado na aquisição dos materiais e na dosagem das argamassas industrializadas, é possível obter um revestimento com desempenho 100% garantido, sendo ainda possível encontrar problemas como fissuração e baixa aderência ao substrato.

Assim, no caso das argamassas de assentamento e revestimento, existem ainda lacunas no tocante à normatização dos produtos industrializados, tanto pelo grande número de aplicações e variáveis envolvidas, quanto pela falta de consenso técnico quanto às propriedades críticas das argamassas que mais podem influir no

desempenho de alvenarias e revestimentos de tetos, pisos e paredes, mesmo em condições padronizadas de aplicação ou exposição (SELMO *et al.*, 2002), como analisado no item 3.5.3.

3.5.1.2 Argamassas dosadas em central e outras

As argamassas dosadas em central e as misturas semiprontas foram inicialmente regulamentadas no Brasil pela NBR 13281/01, pois esta tratou de uma especificação genérica para revestimentos de argamassa e foi mais recentemente substituída pela NBR 13281/05, a ser analisada mais adiante.

A Tabela 45 é adaptada de SELMO (2002) e diferencia as argamassas dosadas em central das misturas semi-prontas e das argamassas intermediárias, pois esses conceitos ainda não estão devidamente difundidos pelas normas brasileiras.

Tabela 45: Diferenciação de conceitos entre outros tipos de argamassa quanto às condições de preparo e dosagem.

Argamassa dosada em central	Argamassa simples ou mista, cujos materiais constituintes são medidos em massa em uma central mecanizada de pesagem e mistura, a partir de traços empíricos ou experimentais.
Mistura semipronta para argamassa	Mistura fornecida ensacada ou a granel, cujo preparo é completado em obra, por adição de aglomerante(s), água e, eventualmente, aditivo(s).
Argamassa intermediária	Argamassa de cal, dosada em obra ou fornecida semipronta, cujo preparo é completado em obra, por adição de cimento, água e, eventualmente, aditivos(s).

3.5.1.3 Argamassas dosadas em obra

Essas são as argamassas simples ou mistas quanto à composição dos aglomerantes e cujos materiais constituintes são medidos, geralmente, em volume, a partir de traços empíricos e misturados à mão ou em betoneiras comuns. Não são argamassas adequadas para receberem aditivos ou adições, exceto se a obra for dotada de uma central dosadora.

Normas revisadas no Brasil, nas duas últimas décadas, como a NBR 13749/96 ou a NBR 7200/98, por razões diversas, omitiram a prescrição de traços empíricos para argamassas dosadas em obra, do que certamente podem se ressentir tanto os construtores, quanto projetistas e os peritos, pois ficaram todos sem qualquer

referência a traços empiricamente aceitáveis, colocando a tecnologia de argamassas essencialmente na dependência de tecnólogos, laboratórios de controle tecnológico ou de fabricantes de argamassas.

Mas, trabalhos recentes de pesquisas em campo feitas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas e no prelo de divulgação mostram que a situação de desempenho de revestimentos em obras não mudou nem mesmo para aquelas com certificação efetiva de construtoras e materiais, devendo, portanto, haver uma melhor avaliação de quais são realmente as necessidades normativas para esses serviços e devem ser repensados se a completa omissão de traços para a execução de revestimentos, pois isto coloca o Brasil em situação singular, face ao que prevalece em outros países.

Por outro lado, interpreta-se que essa omissão, seja decorrente da falta de consenso técnico, pela grande diversidade nacional de areias de rio, de cava e industriais usadas nas argamassas, bem como de adições minerais plastificantes ou de aditivos substitutos da cal.

Todavia, há que se considerar a possibilidade do uso de materiais estritamente conforme as normas técnicas (cimento, cal hidratada e agregados) e para estes não se vê motivos para não se poder adotar traços empíricos consagrados.

Os traços das argamassas dosadas em obra, a partir de cimento Portland, cal hidratada e agregado miúdo natural normalizados poderão ser estabelecidos com base na antiga versão da NBR 7200/82, resumida na Tabela 46 e com aplicações indicadas na Tabela 47 e Tabela 48, sendo que podem ficar sujeitos à aprovação sistemática, mediante a inspeção dos revestimentos.

Cabe salientar que por levantamento feito em SELMO (1989), a maior parte dos traços prescritos por normas européias da época eram muito semelhantes aos da Tabela 46.

No trabalho citado se justificam com base em resultados experimentais da época, depois comprovados e constatados por diversos pesquisadores no Brasil, do por que é viável aceitar traços empíricos na produção de argamassas, com razoável margem de segurança para o desempenho e durabilidade de revestimentos. Importante e que não deve ser relevado, é sim o controle sistemático de inspeção da

execução nas primeiras idades, pois isto é o que pode prevenir eventuais correções necessárias.

Tabela 46: Traços empíricos básicos, em volume, para argamassas de revestimento dosadas em obra, com agregados miúdos naturais e aglomerantes de qualidade controlada. Tabela extraída da antiga NBR 7200/82 (SELMO, 2002).

Grupo	Argamassa	Pasta de cal (A)	Cal hidratada	Cimento	Gesso estuque (D)	Areia	
						(B)	(C)
I	De cal	1	-	-	-	1,5	a 4
		-	1	-	-	2	a 4,5
II	De cimento e cal	1,5	-	1	-	9	a 11
		-	2	1	-	9	a 11
III	De cimento	-	-	1	-	-	3
IV	De cal e gesso	1	-	-	0,1 a 0,2	3	a 4
		-	1	-	0,1 a 0,2	3	a 4

(A) Para determinação posterior do traço deve-se admitir na pasta de cal um teor de umidade de 65% , e na cal virgem, um rendimento de 28 litros por 10 kg, caso sejam desconhecidos os parâmetros para a cal em questão.

(B) Para teor de umidade de 2% a 5% sem correção devida a inchamento.

(C) Valores mínimos – mistura manual; valores máximos – mistura mecânica.

(D) Valores máximos – mistura manual; valores mínimos – mistura mecânica.

Para o uso de agregados de outra origem e não normalizados, como solos finos beneficiados ou “in natura” ou no caso dos agregados reciclados de RCC, o contexto da produção, controle de qualidade e garantia de desempenho das argamassas se torna mais complexo, e o construtor deve se basear nos traços recomendados pelo fabricante ou fornecedor do material. Se não houver, por parte destes, uma assistência e responsabilidade técnica, o risco de uso do material correrá exclusivamente por conta de quem especificou o material e do construtor.

Sob esse prisma, cabe lembrar a importância do desenvolvimento de critérios de desempenho para os revestimentos, pois é a principal ferramenta que o construtor poderá dispor para aceitar argamassas produzidas com traços ou materiais não normalizados, o que por exemplo admite a DIN 18550-1 e é o que consenso que vigorou na normalização europeia atual discutida neste Capítulo.

Tabela 47: Revestimentos internos e respectivos traços empíricos básicos, em volume, para argamassas de revestimento dosadas em obra, da antiga NBR 7200/82 (SELMO, 2002).

Revestimentos internos					
Linha	Utilização do revestimento	Base do revestimento	Grupos de argamassa para		
			Chapisco	Emboço	
			Reboco		
1	Revestimento de paredes internas em locais de grau de umidade normal do ar (inclusive cozinhas e banheiros de habitações) (B)	Alvenaria de tijolos absorventes ou com superfície áspera, concreto não vibrado.	III	I	I
2				II	I, II, IV
3			IV (A)	IV	IV
4		Alvenarias pouco absorventes a lisas, placas leves de fibra de madeira,	II, III	I	I
5				II	I, II, IV
6			IV (A)	IV	IV
7		Concreto vibrado		linha 4 além de	
8			III	III	III
		Em gesso (C)	IV (A)	IV	IV
9	Revestimento de paredes internas em locais permanentemente úmidos	Todos os tipos de construção de paredes	Como em locais de grau de umidade normal de ar com exclusão da argamassa IV.		
(A)	Somente traços ricos em aglomerantes.				
(B)	Para emboços de parede destinada a receber revestimentos especiais sem juntas, vale somente o grupo de argamassa segundo a linha 7.				
(C)	Sobre placas de gesso somente argamassa IV.				

todavia, pela complexidade e número de variáveis envolvidas para cada tipo de argamassa e demais condições de contorno, na execução de revestimentos, a evolução das especificações de desempenho para argamassas e revestimentos devem se manter nas exigências para fabricação, como são as vigentes na atual NBR 13281/05, analisadas no item 3.5.3.

Tabela 48: Revestimentos externos e respectivos traços empíricos básicos, em volume, para argamassas de revestimento dosadas em obra, da antiga NBR 7200/82 (SELMO, 2002).

Revestimentos externos					
Linha	Utilização do revestimento	Base do revestimento (A)	Grupos de argamassa para		
			Chapisco	Emboço	Reboco
1	Revestimento de paredes externas acima dos alicerces	Alvenarias pouco absorventes e lisas, placas leves de construção de fibra de madeira	-	I	I
2				II	I, II
3	Revestimento de paredes externas acima dos alicerces	Alvenarias pouco absorventes e lisas, placas leves de construção de fibra de madeira	-	II, III	I
4				II	I, II
5	Revestimento de paredes externas para embasamento e paredes abaixo nível terreno.	Concreto comum vibrado	-	linha 4 e além disso	
6				III	III
			III	III	III

(A) Revestimentos externos sobre armação de tela metálica.

3.5.2 Quanto à tecnologia de dosagem dos materiais constituintes

Por trabalho do grupo TC 125, da CEN – Comité Européen de Normalisation, publicado desde 1993, discutidos por SELMO *et al.* (2002) e depois transformados em normas europeias de argamassas de assentamento e revestimento, no ano de 2003, podem ser definidos dois tipos básicos de argamassas, quanto à tecnologia de dosagem dos materiais constituintes, a saber:

- “Designed mortars”, que poderiam em português ser ditas argamassas dosadas e produzidas de modo a atenderem as propriedades preestabelecidas ou aos critérios de desempenho, sujeitas a ensaios de comprovação. Também poderiam ser chamadas de **argamassas racionalizadas** ou experimentalmente dosadas, e que devem ser as argamassas industrializadas ou aquelas dosadas em central, pela aplicação de princípios ou métodos tecnológicos de dosagem;

- “Prescribed mortars”, que poderiam em português ser ditas **argamassas empíricas** e produzidas em proporções preestabelecidas e cujas propriedades podem ser assumidas pelo dimensionamento dos constituintes. Aqui poderiam ser enquadradas as argamassas de cimento, cal hidratada e areia, em proporções consagradas, dosadas em obra ou industrializadas por fabricantes, que reproduzam essas proporções de mistura e que aqui já exemplificadas.

3.5.3 Quanto à especificação de propriedades

A normatização de propriedades físicas, químicas ou mecânicas, para a fabricação de produtos, é uma prática inerente às atividades dos mais diversos segmentos industriais, que evolui pela permanente elaboração e revisão das suas normas técnicas. Neste contexto, cabe ao fabricante comprovar a qualidade dos seus produtos e orientar a sua aplicação. Ao comprador compete especificar o que deseja comprar, considerando as suas necessidades, e seguir as instruções do fabricante quanto ao uso do produto escolhido.

A finalidade e a forma de aplicação das argamassas são fatores básicos para a definição de suas propriedades, ou seja: para que e como serão aplicadas?

As propriedades básicas, sempre considerada em normas, são a aderência, isto é, ancoragem a um substrato de aplicação, e o endurecimento. Porém, pode ser muito maior o conjunto de propriedades a que as argamassas de revestimento devem atender. (SELMO *et al.*, 2002).

Cabe reconhecer que a definição de propriedades críticas não é simples e que essa ampla discussão iniciou pela RILEM⁹, na década de 70, possivelmente por pesquisadores como Saretok e culminou em extensa lista de métodos de ensaio para argamassas, em documento da RILEM (1982).

No Brasil, tais propriedades foram inicialmente discutidas por SABBATINI (1984), SELMO (1989) e depois ainda mais detalhadas e difundidas por CINCOTTO

⁹ RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires d’Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions

et al. (1995). Tudo isto pode, em parte, ter contribuído para aumentar o enfoque e o conteúdo atual das normas, sejam nacionais ou estrangeiras.

Mas, há um conjunto básico de propriedades essenciais das argamassas de revestimento, independente do seu uso, factível de ser especificado em projetos e no controle de produção das argamassas, ainda que com ampla variação de critérios, segundo as condições de aplicação ou de serviço do revestimento considerado, quais sejam:

- trabalhabilidade por consistência ou abatimento;
- densidade de massa aparente na argamassa fresca, para efeito de custo e controle de teor de ar;
- resistência à tração, compressão e módulo de elasticidade, pois devem controlar propriedades de fissuração, aderência e durabilidade dos revestimentos e nisto se concentram muitas pesquisas acadêmicas atuais.

Todas as demais propriedades, como retração por secagem, baixa variação dimensional por umedecimento e secagem cíclicos, redução de permeabilidade ou estanqueidade, resistência a agentes químicos, isolamento térmica, acústica ou radioativa serão mais ou menos exigidas em situações específicas de uso dos revestimentos.

Assim, a inter relação entre propriedades das argamassas e o desempenho de revestimentos com argamassas de composição tradicional vem sendo estudada no Brasil de forma bastante intensa, a partir de estudos pioneiros internacionais, revisados em SELMO (1989), e do programa experimental daquela pesquisa associado a outros trabalhos, o que conduziu a uma proposta de metodologia para dosagem de argamassas da autora, depois difundida e aprimorada em diversos outros trabalhos.

Mas, muitas outras importantes pesquisas contribuíram de forma marcante, para a compreensão e domínio do meio técnico nacional acerca da microestrutura e comportamento de revestimentos, cabendo exemplificar as pesquisas de CARASEK (1996) e BORTOLUZZO (2000), entre outras tantas.

Em BORTOLUZZO (2000), por exemplo, tem-se conclusões muito importantes relacionadas à durabilidade de revestimentos e que relevam a importância da resistência de aderência à tração dos revestimentos a um papel secundário, dado ter se constatado que essa propriedade não é essencial ao equilíbrio dos esforços que surgem, seja por movimentação térmica, seja por retração por secagem da argamassa. Desta forma, essa propriedade pode ser importante em situações da falta de manutenção e reparos em revestimentos, mas não de forma genérica e exclusiva para a aceitação de revestimentos, como hoje muitos ponderam. Outra conclusão muito importante do trabalho de BORTOLUZZO (2000) foi de que os traços de menor consumo de cimento se apresentam mais suscetíveis à fissuração e é justamente nas baixas umidades relativas do que a possibilidade de fissuração aumenta.

No Brasil, o desenvolvimento da normalização brasileira não tem retratado os resultados destas pesquisas, nem se espelha nas normas que há décadas vigoram em países desenvolvidos, com princípios mais lógicos e práticos de especificação.

As normas brasileiras têm sofrido alterações substanciais, em função das pesquisas no meio acadêmico e evoluíram de forma muito genérica para normas de desempenho, a partir da primeira versão da NBR 13281, em 1995, e outras que se seguiram, como a NBR 13749/96.

Isto deve ter visado melhorar a abrangência das normas, para os vários materiais e formas de produção das argamassas que emergiram no mercado nas últimas décadas, mas por outro lado acabaram gerando documentos excessivamente exigentes do ponto de vista das propriedades das argamassas, não necessariamente cabíveis a qualquer tipo de argamassa ou a qualquer tipo de obra.

Também seria oportuno que as normas estrangeiras tivessem seus princípios melhor interpretados ao serem difundidos de forma tão genérica, pela normalização brasileira. Pois, pode-se demonstrar que a classificação MERC (Tabela 49) e que inspirou a atual norma brasileira pode ser facilmente interpretada para argamassas com diferentes consumos de cimento e teores de ar e uma vez sendo observada a natureza dos aglomerantes e agregado miúdo empregados.

Tabela 49: Tabela da classificação francesa original, de propriedades identificadas pelo código MERUC e que inspiraram a atual especificação brasileiras, de forma também estendida para argamassas de assentamento, pela NBR 13281/05.

Número de código da linha	Propriedades					
	M	E	R	U	C	
	Densidade de massa endurecida (kg/m ³)	Módulo de elasticidade ressonante (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Retenção de água (%)	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	
1	< 1200	< 5000	< 1,5	< 78	< 1,5	
2	1000 a 1400	3500 a 7000	1,0 a 2,0	72 a 85	1,0 a 2,5	
3	1200 a 1600	5000 a 10000	1,5 a 2,7	80 a 90	2 a 4	
4	1400 a 1800	7500 a 14000	2,0 a 3,5	86 a 94	3 a 7	
5	1600 a 2000	12000 a 20000	2,7 a 4,5	91 a 97	5 a 12	
6	> 1800	> 16000	> 3,5	95 a 100	>10	

No caso de normas estrangeiras, além da classificação MERUC, seria importante aqui destacar os critérios que prevalecem na Comunidade Européia, difundidos no Brasil, através de SELMO *et al.* (2002), indicados na Tabela 50, aplicáveis a argamassas dosadas (item 3.5.1).

Tabela 50: Critérios do projeto prEN 998-1/93, para as argamassas de revestimento de paredes e tetos de edifícios, no caso de serem racionalizadas (“designed mortars”). Selmo *et al* (2002)

Propriedade	Identificação	Valores médios ⁽¹⁾ (MPa)
Resistência à compressão	CS I	0,4 – 2,5 ⁽²⁾
	CS II	1,5 – 5,0 ⁽²⁾
	CS III	3,5 – 7,5 ⁽²⁾
	CS IV	> 6,0
Absorção de água por capilaridade	W 0	Não requerida
	W 1	W ≤ 2,0 kg/m ² .h ^{0,5}
	W 2	W ≤ 1,0 kg/m ² .h ^{0,5}

¹ Todos os valores deverão ser confirmados após os métodos de ensaio e outras normas EN relevantes terem sido finalizadas.
² Os limites superiores são recomendados.

Os critérios de sucção capilar de água têm provavelmente origem em trabalho de KÜNZEL (1977) *apud* SELMO (1989). Propôs este pesquisador que a sucção capilar de água de argamassas da ordem de 2 kg/m².h^{0,5} seria suficiente para

revestimentos externos submetidos a moderadas condições de exposição, considerando que a maior parte dos componentes de alvenaria, na Alemanha, apresentavam valores de sucção capilar acima desse valor.

Para as argamassas racionalizadas, o citado projeto indica a verificação dos requisitos da Tabela 51, sendo que, por ora, apenas estabelece critério e classificação para a resistência à compressão das argamassas, talvez a título de simplificação.

Para as argamassas racionalizadas, o citado projeto indica a verificação dos requisitos da Tabela 51, sendo que, por ora, apenas estabelece critério e classificação para a resistência à compressão das argamassas, talvez a título de simplificação.

Verifica-se, na Tabela 51, que nem todas as propriedades no estado endurecido estão sendo consideradas comuns para as duas aplicações, o que pode ser esperado, principalmente, no tocante a ensaios de desempenho. Mas, chamam atenção os seguintes aspectos:

- não há ainda métodos de ensaio e nem tampouco critérios de desempenho para todas essas propriedades;
- entre as novas propriedades agora consideradas, incluiu-se o rendimento e a manutenção de trabalhabilidade, que parecem ser fundamentais para as argamassas aditivadas e para diferenciar os produtos do mercado;
- as propriedades de aderência e durabilidade estão apenas indicadas para as argamassas de assentamento, o que em princípio não faz sentido e pode ser indicativo de textos publicados com diferentes níveis de revisão. Estas são, a rigor, as únicas propriedades relacionadas ao desempenho efetivo das argamassas aplicadas, mas de elevada relação com os demais fatores intervenientes no desempenho de revestimentos.

Tabela 51: Propriedades das argamassas de revestimento e de assentamento, em projetos de normas européias, prEN 998-1/93 e prEN998-2/93, respectivamente. (SELMO *et al.*, 2002).

	Propriedades indicadas	Aplicações usuais ⁽¹⁾	
		Assentamento de alvenarias	Revestimento de paredes e tetos
Estado anidro	Dimensão máxima dos grãos	---	X
	Teor de água de amassamento	---	X
Estado fresco	Rendimento	---	X
	Consistência	X	X
	Densidade de massa aparente	X	X
	Teor de ar aprisionado	X	X
Estado endurecido	Retenção de água	X	X
	Tempo de aplicação	X	X
	Densidade de massa específica	---	X
	Resistência à tração na flexão	---	X
	Resistência à compressão	X	X
	Módulo de elasticidade	---	X ⁽²⁾
Estado endurecido	Resistência de aderência	X ⁽²⁾	---
	Teor de cloretos	X ⁽²⁾	---
	Durabilidade	X ⁽²⁾	---

¹ Não estão aqui incluídas as propriedades para argamassas de isolamento térmica, acústica ou com propriedades diferenciadas quanto a gelo/degelo ou resistência ao fogo.

² Propriedades listadas, mas ainda sem métodos de ensaio, segundo os projetos indicados.

A julgar pela Tabela 51, a expectativa é de que ainda prevaleçam especificações para argamassas, baseadas em suas propriedades intrínsecas e em métodos de ensaio prescritivos, bastante adequados para processos de fabricação ou de compra, ainda que não possam responder, integralmente, pelo desempenho efetivo na aplicação. Salienta o referido documento que, para as argamassas racionalizadas, caberá ao fabricante indicar as possibilidades de aplicação. Já para as argamassas tradicionais empíricas, esse documento indica que as suas condições de aplicação serão ditadas pela norma nacional vigente em cada país. (SELMO *et al.*, 2002).

O projeto em questão menciona ainda que testes de desempenho para argamassas devem ser exigidos apenas para as argamassas racionalizadas, e justifica que para as argamassas tradicionais há relativa experiência acumulada para atestar o seu desempenho satisfatório. Ou seja, prevalece a orientação então existente na norma alemã da década de 80, analisada em SELMO (1989).

No Brasil, as argamassas tradicionais dosadas em obra, obtidas de cimento, cal hidratada e areia lavada de rio ou cava, estão sem regulamentação de proporções de mistura empíricas, seja na NBR 7200/00, na NBR 13749/96 ou na NBR 8545/84, sendo as duas primeiras relativas a revestimentos e a última de alvenarias de vedação.

Em 31 de outubro de 2005 entraram em vigor as revisões feitas em um conjunto de normas brasileiras relativas às argamassas de assentamento e revestimento, encabeçadas pela NBR 13281/05.

A NBR 13281/05 substituiu a NBR 13281/95 que se referia somente às argamassas industrializadas, trazendo um novo método de classificação para argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos, seja ela industrializada, dosada em central ou preparada em obra, como mostrado na Tabela 52. Observa-se que classificação foi inspirada na MERUC, mostrada na Tabela 49, a partir de estudos de caracterização das argamassas industrializadas do mercado, pela dissertação de NAKAKURA (2003).

Tabela 52: Classificação das argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos., conforme a NBR 13281/05.

Propriedades						
D	U	P	R	M	C	A
Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Retenção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Densidade de massa endurecida (kg/m ³)	Coefficiente de capilaridade C (g/dm ² .min ^{1/2})	Resistência de aderência à tração (MPa)
1	≤ 78	≤ 2,0	< 1,5	≤ 1200	< 1,5	< 0,20
2	72 a 85	1,5 a 3,0	1,0 a 2,0	1000 a 1400	1,0 a 2,5	
3	80 a 90	2,5 a 4,5	1,5 a 2,7	1200 a 1600	2,0 a 4,0	≥ 0,20
4	86 a 94	4,0 a 6,5	2,0 a 3,5	1400 a 1800	3,0 a 7,0	≥ 0,30
5	91 a 97	5,5 a 9,0	2,7 a 4,5	1600 a 2000	5,0 a 12,0	-
6	95 a 100	> 8,0	> 3,5	> 1800	> 10,0	-

Em todos os casos, para determinação da classificação na sobreposição entre as faixas, deve ser considerado o desvio de cada ensaio. Caso o valor fique no meio de 2 faixas, adota-se a maior como classificação.

A NBR 13281/05 traz ainda o procedimento de inspeção no recebimento de argamassas industrializadas, conforme resumido na Tabela 53.

Tabela 53: Procedimento de inspeção de recebimento de argamassas industrializadas e dosadas em obra ou central, conforme a NBR 13281/05.

Parâmetro	Argamassa industrializada	Dosada em obra ou central
Tamanho do lote	Estabelecido em comum acordo entre o fabricante e o cliente, ou a quantidade de argamassa de cada tipo e fabricante, da mesma data de fabricação.	No máximo 200 t da soma dos materiais em cada tipo de argamassa.
Amostragem	Feita para cada lote, com uma amostra com no mínimo 50 kg.	Feita para cada lote. A amostra deve consistir na quantidade de argamassa preparada com um saco de cimento.
Exemplares	2 de aproximadamente 25 kg cada (1 de testemunho).	2, sendo um de testemunho.
Ensaio	Tabela 52	
Aceitação	Se os resultados atenderem às exigências desta norma. Se não atender, refazer os ensaios com a amostra testemunho	
Rejeição	Se não atender às exigências da norma. Variação de massa > 1% para sacos > 25 kg e > 2% para sacos < 25 kg.	Se não atender às exigências da norma.

A NBR 13277/05 traz como novidade a determinação da retenção de água de argamassas através do funil de Büchner, modificado conforme a NBR 9290, com bomba de vácuo. A NBR 13280/05 especifica que a densidade de massa no estado endurecido seja determinada em moldes prismáticos de 4 x 4 x 16 cm moldados conforme a NBR 13279/05. Esta, por sua vez, relativa à determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, substituiu os corpos-de-prova cilíndricos por prismáticos de 4 x 4 x 16 cm, com velocidades de carregamento de 50 N/s para a tração e 500 N/s para a compressão, o que aparenta ser alto para argamassas de baixa resistência.

Existe ainda a dúvida se as normas brasileiras não deveriam, em parte, se fundamentar em especificações de propriedades para as argamassas industrializadas, baseadas nas misturas tradicionais, e admitindo-se o uso de cimento, cal hidratada e areia dentro de certos limites ou padrões de qualidade¹⁰, o decorrer do fato de que não existem no Brasil critérios de desempenho suficientemente evoluídos ou abrangentes para se abandonar completamente referências às dosagens empíricas consagradas para as argamassas tradicionais (SELMO *et al.*, 2002).

Acredita-se, portanto, que ainda há a necessidade de continuar aplicando o conceito de desempenho comparativo. Mesmo que isto não seja o ideal, poderá agilizar e melhor fundamentar os trabalhos normativos, principalmente, no tocante à classificação de resistência mecânica de argamassas. Prevalecendo a situação atual da NBR 13281/05 de classificar argamassas sem indicar as suas aplicações, corre-se o risco dessa norma continuar servindo apenas para a certificação formal de produtos. Por outro lado, isto também não atende a construtores e profissionais liberais, que investem na compra de normas como documento de consolidação e atualização do conhecimento (SELMO *et al.*, 2002).

Além disso, este comitê ainda não contemplou uma etapa importante no que diz respeito à tecnologia de argamassas que é a especificação de níveis mínimos e máximos para as principais propriedades em função da aplicação, o que deveria ser o próximo passo a ser dado.

Possivelmente, a evolução dos critérios de desempenho de argamassas só possa advir de uma parceria constante entre todos os segmentos envolvidos na tecnologia e uso de argamassas, sustentada por um planejamento racional de pesquisas e controle tecnológico de obras.

¹⁰ Afinal, os padrões granulométricos ideais e outros índices de qualidade de agregados miúdos, para a produção de argamassas, já são discutidos no Brasil desde a década de 80, a partir de normas internacionais. Por exemplo, em SELMO (1986) e já foram aprofundados por estudos diversos, como o de CARNEIRO (1999). No tocante à influência da cal em argamassas, este também foi um aspecto exaustivamente discutido no Brasil e não se vêem maiores dificuldades para se estabelecer os seus limites de emprego nas argamassas.

3.6 Argamassas e revestimentos feitos com areia reciclada de RCC

Entre as possíveis alternativas de aplicação dos reciclados de RCC está a produção de argamassas de revestimento, sendo que este uso apresenta as seguintes vantagens:

- não possui responsabilidade estrutural;
- é tradicional o uso de argamassas nas obras brasileiras, sendo o consumo da ordem de 0,13 m³/m² construído (SOUZA; FRANCO, 1997);
- pode representar uma economia de cerca de 40% no custo do m³ da argamassa.

Entretanto, deve ser feito um uso racional da areia reciclada, uma vez que esta geralmente possui variações maiores de propriedades que a areia natural.

3.6.1 Características das areias recicladas de RCC e influência nas argamassas

A areia reciclada pode apresentar um comportamento bem variado, quando utilizada na produção de argamassas, em função, principalmente, de sua composição mineralógica predominante.

Isto significa que argamassas que contêm, por exemplo, areia reciclada composta principalmente de resíduos cerâmicos, poderão apresentar maior consumo de água para uma mesma trabalhabilidade, maior retenção de água e menor resistência mecânica que argamassas feitas com areia proveniente da reciclagem de concreto estrutural.

Esta diferença de comportamento das argamassas é causada por diferenças em diversas propriedades físicas da areia reciclada, como granulometria, teor de finos e absorção de água (MIRANDA, 2000).

A granulometria gerada depende de alguns fatores, sendo os principais a natureza mineralógica do material e o tipo de equipamento. Isto porque a energia de britagem depende do tipo de material. Ela é menor para argamassas e maior para concretos leves. Valores típicos estão entre $E_s = 4,6$ e $10,3$ J/g (MOMBER, 2002).

MIRANDA (2000) concluiu que a granulometria formada após a reciclagem dos resíduos influencia significativamente nas propriedades das argamassas. Por exemplo, blocos de concreto e blocos cerâmico (de boa qualidade de queima) e que geraram areias de granulometrias muito semelhantes depois de reciclados, produziram argamassas com propriedades praticamente idênticas, quando se corrigia a absorção de água do agregado. Mas, agregados de argamassas moída, que possuía uma granulometria muito fina e uniforme, produziu argamassas com propriedades bem diferentes das outras duas.

Uma propriedade muito útil para diferenciar a natureza, por exemplo, de agregados reciclados, é a porosidade aparente, uma vez que a resistência do material decresce com o aumento da porosidade. De acordo com HENDRIKS (2000), a porosidade (volume de poros em relação ao volume de material sólido) fica entre 12% e 20% para concretos estruturais e de 20% a 55% para alvenaria cerâmica britada.

A absorção de água, propriedade totalmente relacionada à sua porosidade, é considerada por SCHULZ (1993) como a mais importante para a produção de concretos com agregados reciclados. Se os poros desses agregados não estiverem saturados, eles podem extrair água da pasta, o que prejudicará a trabalhabilidade. A capacidade de absorção de água dos agregados reciclados depende da quantidade, espécie e tamanho das partículas de cada constituinte e da quantidade de água livre.

Para minimizar este problema, SCHULZ (1993) propõe os seguintes métodos para se trabalhar com agregados absorventes:

- adição suplementar de água de acordo com os resultados do teste de absorção de água após 30 minutos de mistura com água;
- saturação dos agregados por pré-encharcamento;
- adição de água à argamassa no local de aplicação de acordo com a trabalhabilidade requerida.

O primeiro método tem como problema o teor de umidade que pode estar já presente no agregado. Adicionando-se água em função da absorção irá exceder o teor máximo calculado.

O segundo é teoricamente o melhor e mais preciso. Porém, na prática exige equipamentos adicionais e capacidade de armazenamento do material saturado, que pode ficar submerso em água; porém, isso pode causar dificuldade de carregamento e descarregamento. Também o agregado pode ficar muito úmido e alterar excessivamente a relação a/c do conglomerado produzido.

O terceiro método é o preferido em canteiros-de-obras porque a trabalhabilidade é prioridade, mas a relação a/c efetiva variará. A máxima adição de água suplementar tem que ser determinada por testes adicionais e tem que ser restrita por medidores de água.

Também devido à absorção de água dos agregados reciclados, é recomendado, durante a mistura dos materiais, que o agregado seja colocado em contato com o cimento somente após estar saturado, para que se evite que o agregado absorva o cimento diluído na água. LIMA (2000) afirma que se deve deixar o agregado em contato com água no mínimo 2 minutos antes de entrar em contato com o cimento, devido à absorção de água do agregado. MIRANDA (2000) encontrou que mais de 90% da absorção de água da areia reciclada acontecia nos 10 primeiros minutos.

No trabalho de MIRANDA (2000) para composições feitas de bloco cerâmico, bloco de concreto e argamassas de cimento, cal e areia, a principal diferença de comportamento entre as areias recicladas de bloco cerâmico e de bloco de concreto foi a absorção de água, muito maior para a gerada pela moagem de blocos cerâmicos. Quando se corrigiu a relação água/cimento das argamassas feitas com areias recicladas de bloco cerâmico e de bloco de concreto em função da absorção, a consistência e as resistências mecânicas obtidas foram praticamente idênticas.

Observou-se também influência significativa da natureza da fração passante na peneira de 75 µm na consistência das argamassas. Aquela feita de areias recicladas de argamassa mista se apresentou bem mais seca que as demais quando se fixou a distribuição granulométrica; porém, quando se retirou a fração de material passante na peneira de malha 75 µm, esta argamassa apresentou uma consistência bem mais fluida que as outras duas. Como este material, além de poder conter contaminantes, é de difícil controle granulométrico em uma usina devido à finura, MIRANDA (2000)

sugeriu que, em usinas de reciclagem, a fração < 0,15 mm seja substituída por outro plastificante, como a cal ou aditivo.

Um fator que faz reduzir a qualidade de produtos feitos com agregado reciclado, principalmente em concretos, é o teor de matriz ligante no agregado reciclado. Aumentando a quantidade de cimento no concreto britado, por exemplo, aumenta-se a absorção de água e diminui-se a densidade. Essas características desfavoráveis são mais nítidas na fração fina do agregado reciclado. Por isso, na maioria dos estudos feitos em concreto com agregado reciclado, a fração fina foi trocada por areia natural (WEIMANN; MÜLLER, 2004).

A quantidade de pasta aglomerante (cimento, gesso e cal) em um agregado reciclado pode ser determinada através do ensaio de lixiviação em ácido HCl 20%, desde que rocha calcária não seja usada como agregado na região (ANGULO *et al.*, 2004).

3.6.2 Argamassas de revestimento com areia reciclada de RCC

De fato, argamassas com areia reciclada apresentam comportamentos diferentes daquelas feitas com areia natural. Em geral, devido ao alto teor de finos e à absorção de água dos agregados reciclados, tem-se argamassas com melhores características de trabalhabilidade no estado fresco, mas, em vários casos, com piores resultados no estado endurecido.

Como exemplo, a grande retração por secagem das argamassas de areias recicladas de RCC é causada, entre outros fatores, pela grande porosidade e absorção de água dos agregados reciclados, que influenciam sobre os mecanismos de migração da água (MESBAH; BODIN, 1999).

O desenvolvimento da tecnologia de argamassas recicladas, aliás, pode talvez até ser baseado no comportamento e normas de alguns tipos de agregados leves industriais, pois estes são bastante estudados em pesquisas internacionais e já é bem conhecido o desenvolvimento da interface pasta agregado.

Por exemplo, LO *et al.* (1999) avaliaram a microestrutura e a taxa de absorção de água de concretos feitos com agregados leves de argila expandida, que podem guardar alguma analogia com agregados reciclados. A análise em microscópio

eletrônico mostrou uma boa ligação mecânica entre a interface cimento / agregado, apesar da presença de microfissuras que podem ter surgido durante os períodos iniciais de hidratação, causadas pela difusão de água da fase cimentícia dentro dos agregados. Quando o tempo de pré-umedecimento do agregado aumentou, a trabalhabilidade e a resistência do concreto também cresceram. Uma análise em EDAX (Energy Dispersion X-ray Analyser) confirmou a migração de cimento para dentro do agregado.

São consideradas três zonas no gráfico de retração livre versus perda de massa de argamassas com de areia reciclada de RCC (MESBAH; BODIN, 1999):

- zona 1: retração devido à saída de água dos poros (menor retração);
- zona 2: retração devido à saída de água dos poros capilares (maior retração);
- zona 3: ganho de massa, observado em argamassas com areia reciclada. Está ligado à carbonatação e explicado pela alta porosidade dessas argamassas que torna a penetração de gás carbônico possível.

Outro ponto que deve ser considerado é a presença de sais ou sulfatos solúveis em agregados reciclados, provenientes, por exemplo, da demolição de alvenarias com revestimento de gesso.

AGUIAR (2004) avaliou a influência da presença de sulfatos em agregados reciclados da usina de Socorro/SP nas propriedades de argamassas de assentamento. Apenas a presença do revestimento de gesso nas alvenarias aumentou quase 3 vezes o teor de sulfatos solúveis nos agregados reciclados. Como conclusões da pesquisa, tem-se:

- a resistência à tração na flexão foi a propriedade mais afetada para as 20 argamassas testadas neste trabalho e com redução generalizada de valor aos 175 dias;
- as argamassas produzidas com agregado reciclado, cimento e cal apresentaram menor liberação de sulfatos solúveis ao longo do tempo, prevendo-se uma maior durabilidade, no que se refere à formação de sais e de compostos expansivos que possam ser gerados;

- a cal mostrou-se um constituinte essencial e seu uso se mostrou factível mesmo para baixos consumos de cimento. O uso da cal foi vantajoso e é tecnicamente recomendado;
- para o uso destinado à argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, considera-se recomendável adotar os limites preconizados pelo IGS (Tabela 36). Também o limite da norma alemã pode ser sugerido (Tabela 35), pois este foi o único localizado em normas para agregados reciclados destinados a argamassas. Essa recomendação visa prevenir a deterioração de alvenarias produzidas com argamassas de agregados reciclados e que fiquem sujeitas à ação de umidade, pois há riscos de anomalias e prejuízo de desempenho.

CARNEIRO *et al.* (2001), no âmbito do Projeto Entulho Bom desenvolvido na Bahia, fizeram diversos testes em argamassas com areia reciclada, tendo de forma resumida, chegado às seguintes conclusões:

- de um modo geral, a argamassa com 50% de agregado reciclado apresentou o melhor desempenho na maioria das propriedades avaliadas, destacando-se como o teor mais indicado para a produção de argamassas com os materiais utilizados pelo Projeto Entulho Bom;
- é sugerida a avaliação do processo de incorporação de ar da argamassa, ao se utilizar agregado reciclado, sobretudo quando misturado em betoneira;
- a produção de argamassas com agregado reciclado é simples e resulta num produto final de qualidade, possibilitando o seu uso como revestimento de moradias.

Quanto às conclusões descritas acima, este autor faz as seguintes considerações:

- para a viabilidade financeira de uma usina de reciclagem, é fundamental que sejam buscados meios que permitam que a areia reciclada seja utilizada em argamassas substituindo 100% da areia natural;

- como mostrado no Anexo G, para se viabilizar o uso de aditivos incorporadores de ar em argamassa com areia reciclada, primeiramente é necessário desenvolver um processo de produção desta areia com baixa variabilidade nas propriedades;
- qualquer pesquisa que avalie o comportamento quanto à fissuração e à variabilidade de desempenho de revestimentos de argamassa com areia reciclada concluirá que o uso de areia reciclada para esta finalidade não é simples e que, na maioria dos casos, resulta em revestimentos totalmente fissurados e com resistência superficial imprevisível, no caso de ausência de testes preliminares.

3.6.3 Revestimentos de argamassa com areia reciclada de RCC

Em revestimentos de argamassa, uma boa resistência de aderência depende principalmente da qualidade da zona de interface. A argamassa com agregado reciclado mostrou excelente resistência de aderência com blocos devido à alta qualidade da zona interfacial (CORINALDESI *et al.*, 2000). A presença de material reciclado reduz a tensão (“yield stress value”), mantendo-a baixa, por um longo tempo, como mostrado por meio de testes reológicos por MORICONI *et al.* (2003). Dessa forma, a argamassa pode penetrar melhor pela superfície do bloco, assegurando um intertravamento físico e, como consequência, uma melhor aderência (MORICONI *et al.*, 2005).

São diversas as causas intrínsecas que podem provocar fissuração em revestimentos de argamassa. Em geral, o excesso de consumo de água de amassamento e a presença de um teor elevado de materiais pulverulentos são considerados as principais razões de fissuração de origem intrínseca. Isto porque são os principais causadores de retração das argamassas. Considera-se que concretos e argamassas desenvolvem fissuras quando retraem acima de 0,04% (RAMACHANDRAN, 1995).

MIRANDA; SELMO (2005) compartilham de opinião semelhante. Para o controle de fissuras em revestimentos de argamassa com areias recicladas de RCC, a tensão capilar deve ser reduzida por meio de um bom projeto de dosagem que

controle, principalmente, o teor de finos, a distribuição granulométrica e a relação água/cimento.

Pouco se tem publicado sobre revestimentos de argamassa com areias recicladas de RCC, mas sabe-se que este problema pode ser ainda mais grave. Isto porque, além de normalmente apresentarem grande quantidade de materiais pulverulentos, estes materiais podem sofrer grandes variações de composição e de distribuição granulométrica, produzindo assim revestimentos com ampla variação de desempenho.

MIRANDA (2000), após analisar doze argamassas na proporção 1:9 em massa, feitas com cimento CP II E 32 e entulhos de bloco cerâmico, restos de argamassa e blocos de concreto misturados em diversas proporções, concluiu que o teor total de finos < 75 µm presentes em argamassa com areia reciclada de RCC é um parâmetro mais importante para controle de fissuras em revestimentos feitos com agregado reciclado do que a relação água/cimento, e sugere que este teor não ultrapasse 25% para se reduzir o risco de fissuras. Diversas outras propriedades também foram avaliadas, como aderência ao substrato, resistência ao choque térmico e absorção capilar. Dessas propriedades, somente os resultados de absorção capilar foram piores do que os da argamassa mista de referência de cimento, cal e areia.

A Figura 35 apresenta alguns revestimento de argamassa feitos com material reciclado (MIRANDA, 2000). Como o agregado reciclado de RCC normalmente possui entulho cerâmico em sua composição e este, após moído, gera bastante material pulverulento, é comum que os revestimentos de argamassa feitos com esse agregado tenham uma coloração avermelhada.

Os revestimentos da Figura 35 foram expostos a 10 ciclos de choque térmico acelerado através de aquecimento até 80 °C e molhagem. Estes ciclos causaram o surgimento de fissuras que variaram de acordo com as propriedades intrínsecas das argamassas (Figura 36). Fissuras visíveis foram observadas em revestimentos que tinham alto teor de finos, enquanto microfissuras surgiram nos revestimentos com baixa resistência à tração na flexão. Não foi observada perda de resistência de aderência com a aplicação de choque térmico até 80 °C.



Figura 35: Revestimentos de argamassa produzidos com areia reciclada (MIRANDA, 2000).

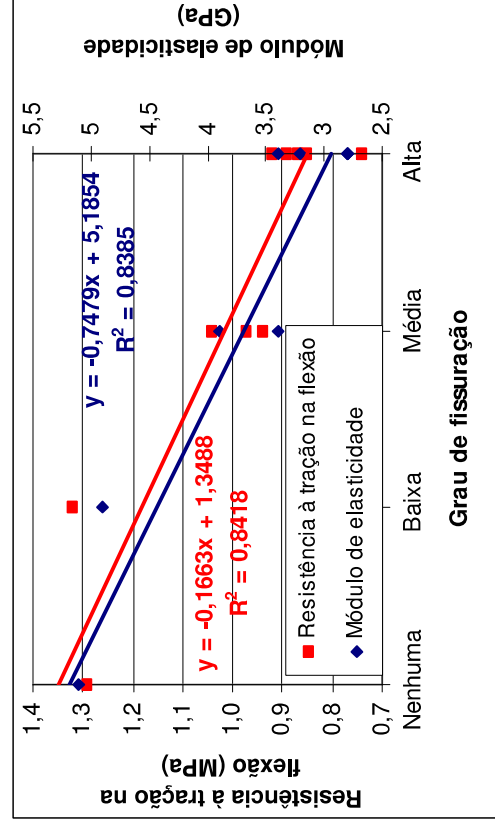


Figura 36: Correlação entre a resistência à tração na flexão e o surgimento de microfissuras em revestimentos de argamassas com areia reciclada (MIRANDA; SELMO, 2005).

Uma grande preocupação que se deve ter quando se pretende produzir revestimentos de argamassa com agregados reciclados é na contaminação deste com sais solúveis. A formação de etringita tardia pode provocar pressões, causando expansão e fissuração, pois as reações de hidratação do cimento já estão avançadas e já ocorreu o fim de pega, não havendo mais espaço para o aumento de volume

causado pelas moléculas de água do composto. A deterioração mais comum e correlacionada com a solubilização de sais em materiais cimentícios é a formação de eflorescência (AGUIAR; 2004).

3.6.4 Dosagem das argamassas

O método de dosagem deve garantir que a argamassa seja trabalhável enquanto fresca apresente um bom desempenho depois de aplicada, principalmente, quanto à aderência ao substrato, resistência à fissuração e permeabilidade, no caso de revestimento externo.

MIRANDA (2000) conclui que o método de dosagem de argamassas tradicionais de cimento, cal e areia proposto por SELMO (1989) também pode e deve ser aplicado para dosagem de argamassas feitas com areia reciclada.

SELMO (1989) propôs uma metodologia experimental de dosagem de argamassas baseada em dois parâmetros, um para controle de propriedades associadas ao estado fresco e retração das argamassas (item 3.6.4.1) e o outro para definição das demais propriedades importantes para o desempenho dos revestimentos, como aderência, permeabilidade e resistência superficial (item 3.6.4.2), devendo-se eleger os critérios críticos de desempenho a serem atendidos em função do tipo de revestimento.

3.6.4.1 Trabalhabilidade e retração por secagem

SELMO (1989) conclui que o teor total de finos < 75 μm das argamassas, sejam eles os finos dos aglomerantes, dos agregados miúdos ou das adições, no total de materiais secos em massa, é o melhor parâmetro para o controle da trabalhabilidade de argamassas e retração de revestimentos.

A proposta deste parâmetro alternativo foi decorrente:

- a) da sugestão de LAHUERTA; MONTERDE (1984), para classificação da plasticidade das argamassas, com base no *teor total de finos* < 75 μm , no total de materiais secos em massa, pelos seguintes critérios¹¹: abaixo de 15%, as

¹¹ Para argamassas que contêm aditivos estes valores podem ser reduzidos de 5%.

argamassas são consideradas “magras”; na faixa de 15% a 25%, “médias” e acima de 25%, “gordas”;

- b) de experimentos práticos com pedreiros, conduzidos pela orientadora deste trabalho e que estão registrados em SELMO (1989), pelos quais constatou que o teor de finos < 75 µm, procedente da cal ou de adições plastificantes minerais (saibros ou solos finos beneficiados), pode ser expresso de forma aproximadamente proporcional ao teor total de agregado miúdo, estando ambos expressos em relação à massa de cimento da argamassa.

3.6.4.2 Demais propriedades de desempenho

Para controlar as propriedades mecânicas das argamassas e o desempenho dos revestimentos quanto à sua aderência ao substrato, SELMO (1989) propôs o parâmetro “(agregado + cal) / cimento”, em massa, considerando que a cal em argamassas mistas com cimento Portland possui a função principal de plastificante e não de aglomerante. A rigor, foi demonstrado por essa autora que a “relação água / cimento” das argamassas mistas seria a principal responsável pelas propriedades de aderência e permeabilidade dos revestimentos, mas que pode ser muito bem correlacionada com a relação “agregado + cal / cimento”.

4 AMOSTRAGEM PROBABILÍSTICA, CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO E EXEMPLOS PARA CONCRETOS E ARGAMASSAS

Uma etapa fundamental na produção de qualquer componente industrializado é a verificação de sua conformidade em relação às normas vigentes ou, na falta desta, aos requisitos estabelecidos pela própria empresa produtora (controle de produção) ou compradora (controle de recebimento).

No caso da indústria de materiais de construção, muito pouco se discute na academia ou em artigos sobre dados reais de controle de processo ou de recebimento por terceiros.

HELENE; TERZIAN (1992) ajudaram a difundir esses conceitos, resumindo as variáveis e questões envolvidas, conforme a Tabela 54.

Tabela 54: Mecanismos de controle da qualidade (HELENE; TERZIAN, 1992).

Questões	Controle de produção	Controle de recebimento
O que é?	Controle dos fatores que intervêm na qualidade	Comprovação da conformidade
Por que se faz?	Assegurar que se alcance a qualidade especificada ao mínimo custo possível	Verificar que se alcançou, como mínimo, a qualidade especificada
Quem o faz?	O produtor	O promotor, o proprietário
Como se faz?	Inspeção contínua	Inspeção intermitente
Quais as variáveis de controle?	As que intervêm no processo produtivo	As representativas da qualidade especificada
Atua sobre?	O processo	O produto

Para isto, diversas ferramentas estatísticas estão disponíveis, cobrindo desde a etapa inicial de definição de lotes, número de amostras e técnicas de amostragem até a verificação de controle do processo de produção, como detalhado neste capítulo.

4.1 Amostragem

4.1.1 Métodos de amostragem

O primeiro ponto que deve ser observado para a obtenção de amostra representativa de um dado lote de material é o método de coleta. A maneira de se obter a amostra é muito importante e existem vários modos de fazê-lo.

De acordo com MORETTIN; BUSSAB (2003), os procedimentos científicos de obtenção de dados amostrais podem ser divididos em 3 grandes grupos:

- levantamentos amostrais, nos quais a amostra é obtida de uma população bem definida, por meio de processos bem protocolados e controlados pelo pesquisador. Este grupo pode ser dividido em 2 subgrupos: levantamentos probabilísticos e não-probabilísticos. O primeiro reúne todas as técnicas que usam mecanismos aleatórios de seleção dos elementos de uma amostra, atribuindo a cada um deles uma probabilidade conhecida “a priori”, de pertencer à amostra. No segundo estão os demais procedimentos, como amostras intencionais e de voluntários;
- planejamento de experimentos, cujo principal objetivo é o de analisar o efeito de uma variável sobre a outra;
- levantamentos observacionais, onde os dados são coletados sem que o pesquisador tenha controle sobre as informações obtidas, exceto eventualmente sobre possíveis erros grosseiros.

O procedimento resumido para coleta de amostras definido pela NBR 10007/04 é o seguinte: homogeneização de todo o lote com enxada; retirada dos agregados com pá, em mais de 7 pontos para cada lata de 18 litros, alternados de um lado para outro diagonalmente, de forma aleatória, desde a crista até a base, em seqüência não repetitiva.

A norma ASTM D75/97, apresenta um procedimento que se refere especificamente à amostragem de agregados miúdos e graúdos para os seguintes propósitos: investigação preliminar da potencial fonte de suprimentos, controle dos

produtos na origem, controle das operações no local de uso e aceitação ou rejeição de materiais. Os principais pontos desta norma estão resumidamente descritos abaixo:

- as amostras a serem testadas devem ser obtidas do produto final;
- selecione as unidades da produção a serem amostradas utilizando um método randômico, como o descrito na ASTM D 3665/99;
- evite a amostragem de agregados graúdos ou de misturas de graúdos com miúdos de pilhas de estocagem ou de unidades de transporte sempre que possível, principalmente quando a amostragem é feita para o propósito de determinar propriedades do agregado que possam ser dependentes da granulometria da amostra. O procedimento de amostragem deve assegurar que a segregação não introduza uma grande influência nos resultados;
- amostragem de pilhas de estocagem: onde não se tem disponibilidade de equipamentos sofisticados, as amostras devem ser obtidas de ao menos três incrementos tomados do topo, meio e base da pilha. A camada mais externa da pilha de agregados miúdos, que pode ter sofrido segregação, deve ser removida e a amostra tomada do material interno. Tubos de amostragem de aproximadamente 30 mm de diâmetro por 2 m de comprimento podem ser inseridos dentro da pilha em locais aleatórios para extrair um mínimo de cinco incrementos de material para formar a amostra;
- a massa mínima recomendada para agregados miúdos é 10 kg.

O procedimento de amostragem randômica citado pela ASTM D75/97 é definido pela ASTM D3665/99. Esta norma se refere à determinação de locais ou tempos aleatórios nos quais amostras de materiais de construção devem ser obtidas. Ou seja, ela é útil para determinar o local ou tempo, ou ambos, no qual uma amostra deve ser obtida de forma a eliminar ou minimizar qualquer influência, intencional ou não, do operador.

A eficiência dessa prática na obtenção de amostras randômicas é limitada somente pela consciência do usuário em seguir os procedimentos estipulados.

De acordo com a ASTM D3665/99, o método melhor e mais prático para assegurar que amostras de materiais de construção abrangam todo o processo de construção é incorporando um procedimento de amostragem randômico estratificado. Para isto, divide-se o lote a ser amostrado em um número desejado de iguais sub-lotes e amostra-se de forma aleatória cada sub-lote de acordo com essa norma, para obter uma respectiva sub-amostra.

De acordo com cada caso, pode ser utilizado o tempo necessário para se formar o lote ou o volume total do lote. Utiliza-se a tabela 1 dessa norma para obtenção de três valores randômicos (no caso de três sub-amostras) da seguinte forma:

- apontar, sem olhar o lápis, para as colunas de números nas duas folhas da tabela sobre uma superfície plana;
- após escolher um número, a base está estabelecida para se escolher o próximo número randômico por método não influenciado;
- examinar os 2 primeiros dígitos dos 3 do número escolhido. Esses números localizam a linha a ser usada para a escolha do próximo número aleatório;
- definida a linha, escolher uma coluna sem olhar e, para o número encontrado, use o primeiro dígito para definir a coluna. A interseção da linha com a coluna é o segundo número aleatório;
- com os três números obtidos, multiplica-se pelo tempo total ou pelo tamanho total do lote para se obter os horários de obtenção das amostras.

4.1.2 Definição da massa de cada amostra

A massa de cada amostra de areia reciclada pode ser dimensionada de acordo com a teoria de Pierre Gy (LUZ *et al.*, 1998), com as suposições de que o material a ser amostrado está inteiramente homogeneizado e que não existam erros inerentes às ferramentas de amostragem ou equipamento de cominuição. Além disso, as partículas individuais devem ser relacionadas com igual probabilidade. Dessa forma, o erro total de amostragem passa a constituir-se no erro fundamental.

O procedimento para dimensionamento de amostras pela Teoria de Pierre Gy é o seguinte:

a) Determinação do fator de composição mineralógica (Q), em g/cm³:

- Q = produto da média ponderada dos pesos específicos das partículas e os teores do mineral de interesse (x) e ganga (100-x) (cálculo conforme a Equação 2);
- x = teor do mineral de interesse na amostra, em %;
- p_a = densidade de massa específica do mineral de interesse, em kg/l;
- p_b = densidade de massa específica da ganga, em kg/l;
- p = média ponderada das massas específicas de todas as partículas.

$$Q = x(100 - x) \left[\frac{x}{100} p_a + \frac{(100 - x)}{100} p_b \right] \quad \text{Equação 2}$$

b) Determinação de l (fator de liberação do mineral, adimensional, deve estar entre 0,3 e 1):

Apesar de algumas fases, como concreto e rochas ou cerâmica e argamassas não estarem totalmente liberadas, elas ocorrem conjuntamente nos grãos e todas são de interesse econômico para a utilização como agregados. Assim, tem-se:

- d = dimensão máxima das partículas, em cm;
- d₀ = dimensão máxima das partículas que assegure uma completa liberação do mineral de interesse, em cm (estimado por microscopia ótica) (considerado 1,5 neste caso);
- se d < d₀, l = 1; se d > d₀, l = raiz(d₀/d).

c) Determinação de f (fator de forma do mineral, adimensional):

Considerado constante e igual a 0,5 (valor prático adotado).

d) Determinação de h (fator de distribuição de tamanho das partículas, adimensional):

- $h = 0,25$: minérios cominuídos para passar numa abertura de peneira;
- $h = 0,5$: para minérios com granulometria compreendida entre duas peneiras sucessivas da série.

e) Equação geral da teoria de Pierre Gy

- S_a = estimativa do erro total de amostragem expresso com desvio-padrão (cálculo conforme a Equação 3);
- d = dimensão máxima das partículas no material a ser amostrado, normalmente aproximado pela abertura da peneira, em cm, que retém 5% do material;
- W = massa do material a amostrar, em gramas;
- w = massa mínima da amostra, em gramas.

$$S_a = \sqrt{d^3 Q \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{W} \right) l f h} \quad \text{Equação 3}$$

4.1.3 Planos de amostragem aplicados a agregados reciclados

A próxima etapa no controle de produção é a definição do tamanho de cada lote e do número de amostras a serem inspecionadas.

Alguns órgãos internacionais apresentam propostas para o tamanho do lote quando se trata de agregados reciclados, conforme apresentado nos itens seguintes.

4.1.3.1 Critérios RESIBA

A proposta do RESIBA, apresentada em MEHUS *et al.* (2002) e que consta na Tabela 26, mostra que a maior frequência de testes para as propriedades especificadas é de 15 em 15 dias ou a cada 2000 toneladas.

Entretanto, este autor considera que simplesmente fixar o tamanho e o número de amostras a serem retiradas pode desestimular o fabricante a investir em processos mais controlados, com menor variabilidade, sendo mais interessante métodos mais flexíveis de definição dessas variáveis.

4.1.3.2 Critérios holandeses

Na Holanda, a certificação de qualidade de aspectos ambientais dos agregados reciclados é baseada no Building Materials Decree que contém especificações para lixiviação e para a composição de materiais rochosos. Os procedimentos aqui apresentados são para serem usados na certificação de qualidade de agregados reciclados de forma a assegurar que estes materiais obedeçam à legislação. A frequência na qual devem ser realizados os testes nos produtos depende do nível de qualidade que se deseja atingir (HENDRIKS; JANSSEN, 2001³).

Quando em auditoria, um volume de produção do material é dividido em lotes com um tamanho fixo. O produtor deve especificar os termos sob os quais ele forma um lote. No caso de determinação da composição, é requerido que, para cada produto, o tamanho seja de 10% da produção anual. Para determinação de outras propriedades, o tamanho do lote depende da frequência de teste (HENDRIKS; JANSSEN, 2001³).

Sub-amostras individuais devem ser de tamanhos aproximadamente iguais (com uma margem de mais ou menos 25%) e obedecer aos requisitos de tamanho mínimo descritos na Tabela 55. O número mínimo de sub-amostras por amostra e o número de amostras por lote propostos por HENDRIKS; JANSSEN (2001³) estão apresentados na Tabela 56.

Tabela 55: Tamanho mínimo de sub-amostras (HENDRIKS; JANSSEN, 2001³).

Produto	Propriedade	Tamanho mínimo de sub-amostras
Agregados reciclados com presença de aglomerantes	Composição e estabilidade dimensional permanente Outras propriedades	7 kg 3,9 kg
Agregados mistos reciclados com aglomerantes hidráulicos	Todas as propriedades	3,9 kg
Todos os agregados reciclados < 4 mm e areia artificial	Composição Outras propriedades	180 g 2 kg

Tabela 56: Número mínimo de sub-amostras por amostra e número de amostras por lote (HENDRIKS; JANSSEN, 2001³)

Produto	Propriedade	Nº mínimo de sub-amostras por lote
Agregados reciclados com presença de aglomerantes	- Composição e estabilidade dimensional permanente	4
	- Outras propriedades	16
Agregados mistos reciclados com aglomerantes hidráulicos (considerados de mesma origem)	- Composição e estabilidade dimensional permanente	1
	- Outras propriedades	16
Todos os agregados reciclados < 4 mm e areia artificial	- Composição	32
	- Outras propriedades	16
Agregados mistos reciclados com aglomerantes hidráulicos (considerados de diferentes origens)	- Composição	32
	- Outras propriedades	16

4.2 Normas de sistemas da qualidade

As técnicas de sistemas da qualidade para a inspeção de produtos terminados, componentes e matérias-primas, operações, materiais em processamento, materiais estocados, operações de manutenção, procedimentos administrativos, relatórios ou dados são regulamentadas por normas internacionais da International Organization for Standardization (ISO) e definidas por normas brasileiras desde 1985.

Um conjunto de seis normas brasileiras (NBR 5425/85 a NBR 5430/85) fornece as definições necessárias para a aplicação a um sistema da qualidade e define o procedimento para qualquer inspeção, seja ela por atributo ou por variáveis.

A inspeção por variáveis é aquela onde uma característica de qualidade em uma unidade do produto é medida em uma escala contínua, tal como quilogramas, metros, metros por segundo, etc, e cada medição é anotada. A NBR 5429/85 e a NBR

5430/85 estabelecem os planos de amostragem e os procedimentos para inspeção por variáveis, de onde cabe destacar os seguintes itens:

- na inspeção por variáveis a não-conformidade de produtos é expressa em termos de percentagem defeituosa (percentagem estimada em função do índice de qualidade (Q) e do tamanho da amostra (n)). O índice de qualidade (Q) é a relação entre a diferença da média da amostra inspecionada e o(s) limite(s) de especificação superior ou inferior com a medida de dispersão;
- o Nível de Qualidade Aceitável (NQA) deve ser determinado no contrato de fornecimento ou pelo responsável. No caso de um limite de especificação bilateral, um único valor de NQA é especificado para a percentagem defeituosa total fora de ambos os limites (superior e inferior) da especificação, ou então são especificados NQA's, um para o limite superior e outro para o limite inferior;
- O NQA e a letra de código devem ser usados para obtenção do plano de amostragem;
- os planos de amostragem baseados na estimativa da variabilidade desconhecida, método do desvio-padrão, exigem menores tamanhos de amostra para idêntica segurança que os baseados no método de amplitude. Os planos de amostragem baseados na variabilidade conhecida exigem consideravelmente menores tamanhos de amostra para idêntica segurança que os planos baseados em variabilidade desconhecida;
- salvo determinação em contrário, devem ser utilizados planos de amostragem de variabilidade desconhecida, método do desvio-padrão;
- as curvas características de operação para os planos de amostragem por variáveis são baseadas na hipótese de que as medições são feitas em unidades de produto retiradas ao acaso de lotes nos quais a variável considerada tenha uma distribuição normal;

- ao iniciar-se um procedimento de inspeção, deve ser empregado o regime de inspeção normal, salvo determinações em contrário. A inspeção normal, severa ou atenuada deve manter-se inalterável para cada classe de defeitos nos sucessivos lotes, exceto quando pelo sistema de comutação for recomendada uma substituição de regime.

Assim, considera-se que o procedimento de plano de amostragem definido por esta norma possui vantagens porque:

- é fundamentado em técnicas estatísticas consolidadas;
- é um plano dinâmico que pode se adaptar às condições de produção de uma usina de reciclagem. Isto é, o plano de amostragem não é fixo, mas sim definido se normal, severo ou reduzido em função da variabilidade do processo, incentivando o produtor a investir na qualidade do produto visando diminuir gastos com controle tecnológico.

A Tabela 57 apresenta um resumo da seqüência de operações para a aplicação do sistema de controle de qualidade definido pela NBR 5429/85.

Tabela 57: Sequência de operações para aplicação da NBR 5429/85 (NBR 5430/85).

Operações	Explicações
Determinar o tamanho do lote	Tamanho do lote estabelecido pelos critérios de formação do lote, contidos nos documentos de aquisição, ou conforme acordo entre produtor e consumidor
Escolher o nível de inspeção	No início do contrato ou produção é aconselhável usar o nível II. Podem ser usados outros níveis de inspeção, se o histórico da qualidade ou se as dificuldades e custo de controle assim indicarem
Determinar o código literal de tamanho da amostra	É encontrado na tabela da NBR 5429/85 e baseado no tamanho do lote e no nível de inspeção
Escolher o plano de amostragem	Geralmente usa-se o plano de amostragem para variabilidade desconhecida, método do desvio-padrão. Quando especificado no contrato ou outro documento, pode ser utilizado o método da amplitude
Estabelecer o regime de inspeção	No início do contrato ou produção, utiliza-se inspeção em regime normal.
Determinar o tamanho da amostra e a percentagem defeituosa máxima admissível (M)	Baseados nos requisitos para inspeção normal – variabilidade desconhecida, método do desvio-padrão – são encontrados nas Tabelas 2 a 7 da NBR 5429/85; o valor do NQA especificado e o código literal do tamanho da amostra, o tamanho da amostra e a percentagem defeituosa máxima admissível (M)
Retirada da amostra	A amostra é retirada do lote, ao acaso, na quantidade de unidade de produto, conforme determinado nas Tabelas 2 a 7 da NBR 5429/85
Inspeção da amostra	A percentagem defeituosa (p) é obtida por meio do índice de qualidade (Q) nas Tabelas 27 a 34 da NBR 5429/85 e comparada com a percentagem defeituosa máxima admissível (ver Apêndice da NBR 5429/85)

4.3 Controle estatístico do processo (CEP)

Se um produto deve atender a determinados requisitos, ele deve ser produzido por um processo estável ou com capacidade de repetição. Mais precisamente, o

processo deve ser capaz de operar com pouca variabilidade em relação à meta de características de qualidade do produtor (WERKEMA, 1995).

O controle estatístico do processo (CEP) é um conjunto prático de ferramentas, fundamentado em preceitos estatísticos e útil para se alcançar a estabilidade do processo ou melhorar sua capacidade através da redução de variabilidade.

Em qualquer processo de produção, por melhor projetado e mantido ele seja, existirá uma certa quantidade de variabilidade natural, causada por causas comuns, inerentes ao processo e que estarão presentes mesmo que todas as operações sejam executadas utilizando-se métodos padronizados. Um processo que está operando apenas com causas normais (“chance causes of variation” ou “common cause”) é dito estar sob controle estatístico (WERKEMA, 1995).

Mas outra espécie de variabilidade pode estar presente em um processo. Essa variabilidade normalmente surge de três fontes: ajuste ou controle impróprio das máquinas, erro do operador ou matéria-prima defeituosa. Cada uma dessas fontes normalmente produz um nível inaceitável de desempenho do processo. Essas fontes de variabilidade que não são parte de uma causa normal são chamadas de causas especiais (“assignable causes” ou “special cause”). Um processo que está operando na presença de causas especiais é dito estar fora de controle (WERKEMA, 1995).

O maior objetivo do CEP é determinar rapidamente a ocorrência de causas especiais, de forma que uma investigação do processo e ações corretivas possam ser tomadas antes que muitas unidades de produto defeituosas sejam manufaturadas.

Existem sete principais ferramentas de resolução de problemas de CEP que devem ser usadas rotineiramente para identificar oportunidades de melhorias no processo e para reduzir a variabilidade e eliminar resíduos. Estas sete ferramentas são: folha de verificação, estratificação, gráfico de Pareto, diagrama de causa e efeito, histograma, diagrama de dispersão e gráfico de controle.

4.3.1 Folha de verificação

Nos estágios iniciais de implementação de um CEP será normalmente necessário coletar dados sobre o processo, sejam eles históricos ou correntes. Uma alternativa é montar uma folha de verificação orientada com o tempo. Ao projetar

uma folha de verificação (“check sheet”), é importante especificar o tipo de dado a ser coletado, o número de operação, a data, o analista ou qualquer outra informação útil no diagnóstico da causa do baixo desempenho (MONTGOMERY, 2000).

4.3.2 Gráfico de Pareto

É apenas uma distribuição de frequência de dados de atributo arranjados por categoria, como, por exemplo, o gráfico de frequência de ocorrência de cada defeito versus os vários tipos de defeitos. O gráfico de Pareto não identifica automaticamente o defeito mais importante, mas sim aquele que ocorreu mais frequentemente. Assim, um problema que ocorre muito raramente pode ser de extrema importância caso seus efeitos sejam extremamente caros (MONTGOMERY, 2000).

Quando uma lista de defeitos contém uma mistura daqueles que podem ter consequências extremamente sérias e outras menos importantes, um dos métodos abaixo pode ser usado:

- uso de um esquema de pesagem para modificar a contagem de frequência;
- acompanhamento da análise do gráfico de frequência de Pareto com um gráfico de Pareto de custo.

4.3.3 Diagrama de causa e efeito

Uma vez que um defeito, erro ou problema tenha sido identificado, é necessário começar a analisar as causas potenciais dele. Nas situações onde as causas não são óbvias, o diagrama de causa e efeito é uma ferramenta frequentemente útil no delineamento das causas potenciais. Os passos para a construção de um diagrama de causa e efeito são:

- definir o problema ou efeito a ser analisado;
- definir uma equipe para realizar a análise. Frequentemente isto ocorrerá através de “brainstorming”;
- desenhar o box de efeitos e a linha central;

- especificar as principais categorias de causas potenciais e juntá-las como boxes conectados à linha central;
- identificar as causas possíveis e classificá-las dentro de categorias, conforme descrito no item 4.3.4. Criar novas categorias se necessário;
- ordenar as causas para identificar aquelas que parecem impactar mais o problema;
- tomar ação corretiva.

O diagrama de causa e efeito é considerado uma ferramenta muito poderosa. Um diagrama altamente detalhado pode ser uma ajuda muito efetiva (MONTGOMERY, 2000). No Capítulo 3, está exemplificado um diagrama de causa e efeito no formato de espinha de peixe.

4.3.4 Estratificação

Na estratificação, os vários tipos de defeitos são desenhados e o diagrama é analisado para determinar se a locação dos defeitos sobre a unidade conduz a alguma informação útil sobre as causas potenciais dos defeitos (MONTGOMERY, 2000).

4.3.5 Diagrama de dispersão

Muito útil para identificar uma relação potencial entre 2 variáveis. Os dados são coletados em pares sobre as 2 variáveis. A forma do diagrama normalmente indica que tipo de relação pode existir entre as 2 variáveis (MONTGOMERY, 2000).

4.3.6 Gráficos de controle

Os gráficos de controle são uma técnica de monitoramento do processo largamente usada para (MONTGOMERY, 2000):

- estimar os parâmetros de produção do processo e, através desta informação, determinar a capacidade do processo (item 4.3.7);
- fornecer informações úteis para melhoria do processo;
- reduzir, tanto quanto possível, a variabilidade do processo, senão eliminá-la.

O uso mais importante do gráfico de controle é para melhorar o processo. O gráfico de controle detecta somente causas especiais. Gerenciamento, operadores e ações de Engenharia normalmente são necessários para eliminar estas causas (WERKEMA, 1995).

Gráficos de controle para medida de tendência central e variabilidade são chamados de gráficos de controle de variáveis. São compostos por uma linha central que representa o valor da característica de qualidade. Outras duas linhas são também mostradas no gráfico, chamadas de limite superior de controle (ou “upper control limit” – UCL) e limite inferior de controle (“lower control limit” – LCL) (MONTGOMERY, 2000).

Estes limites de controle, também chamados de limites de controle 3σ (3 desvios-padrão), são escolhidos de tal forma que, se o processo está sob controle, aproximadamente 99,7% dos pontos estarão entre esses limites. A amplitude dos limites de controle é inversamente proporcional ao tamanho da amostra para um dado múltiplo de desvios-padrão.

Um ponto que esteja plotado fora dos limites de controle é normalmente interpretado como evidência de que o processo não está sob controle, e investigações e ações corretivas são necessárias para encontrar e eliminar as causas especiais ou as causas responsáveis por este comportamento.

Mas, mesmo se todos os pontos estiverem dentro dos limites de controle, se eles se comportam de maneira sistemática ou não randômica, isto pode ser uma indicação de que o processo está fora de controle. Um exemplo disto é se 18 de 20 pontos estão do mesmo lado da linha central. Outros exemplos são (MONTGOMERY, 2000):

- uma seqüência de 8 ou mais pontos de um lado da linha central;
- um ponto fora dos limites 3σ ;
- 2 ou 3 pontos consecutivos fora do limite de perigo 2σ ;
- 4 de 5 pontos consecutivos plotados fora do limite de 1σ ou além da linha central;

- 6 pontos em seqüência subindo ou descendo;
- uma configuração não randômica dos dados;
- um ou mais pontos próximos ao limite de controle ou limite de perigo;
- 15 pontos em linha na zona c. Zona c é a zona entre a linha central e a linha de 1σ ;
- 14 pontos em linha alternando acima e abaixo da linha central;
- 8 pontos em linha, em ambos os lados da linha central, com nenhum na zona c.

Costuma existir uma razão de um determinado comportamento não randômico aparecer no gráfico de controle. Se ele puder ser encontrado e eliminado, o desempenho do processo pode ser melhorado.

A justificativa típica da escolha do uso de limites de controle 3σ é que ele dá bons resultados na prática. Além disso, em muitos casos, a verdadeira distribuição das características de qualidade não é conhecida o bastante para computar limites de probabilidade exatos. Se a distribuição da característica de qualidade é razoavelmente aproximada para uma distribuição normal, então existirá pouca diferença entre 3σ e 0,001 limites de probabilidade. Entretanto, não é obrigatório que a distribuição seja normal, uma vez que o Teorema Central do Limite estabelece que quando o tamanho da amostra é suficientemente grande, a distribuição da média amostral \bar{x} pode ser bem aproximada por uma distribuição normal, qualquer que seja a forma de distribuição da população, sendo os resultados considerados aproximadamente corretos.

Alguns analistas sugerem dois conjuntos de limite nos gráficos de controle. Um deles é o limite mais externo (“outer limits”) definido por 3σ ; o outro é o limite interno (“inner limits”), usualmente em 2σ , chamado de “warning limits”, representado por UWL e LWL. Se um ou mais pontos estão entre os limites de perigo e os limites de controle, deve-se suspeitar que o processo esteja sob a ação de causas especiais. Uma possível ação a tomar quando isto ocorre é aumentar a frequência de amostragem e/ou o tamanho da amostra tal que mais informações sobre o processo possam ser obtidas. O uso de limites de perigo pode aumentar a

sensitividade do gráfico de controle. A maior objeção em relação ao uso de limites de perigo é que eles aumentam o risco de um alarme falso (MONTGOMERY, 2000).

O gráfico de controle é mais efetivo quando seu uso está integrado em um programa de CEP.

Os gráficos de controle podem ser feitos para um atributo ou uma variável. Quando a característica de qualidade é uma variável, é normalmente necessário monitorar o valor médio e a variabilidade dessa característica (MONTGOMERY, 2000).

O controle do valor médio é feito com o uso de gráficos de controle para média, ou Gráfico X. Já a variabilidade do processo pode ser monitorada ou por gráficos de controle para o desvio-padrão (Gráfico S) ou por gráficos de controle para a amplitude (Gráfico R), que é mais amplamente usado. Normalmente, gráficos X e R separados são mantidos para cada característica de interesse. Os gráficos X e R (ou X e S) estão entre os mais importantes e úteis processos de monitoramento estatístico e técnicas de controle (MONTGOMERY, 2000).

Suponha que a característica de qualidade é normalmente distribuída com média μ e desvio-padrão σ , onde ambos μ e σ são conhecidos. Se x_1, x_2, \dots, x_n é uma amostra de tamanho n , então a média desta amostra é dada pela Equação 4.

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n} \quad \text{Equação 4}$$

Sabe-se que \bar{x} é normalmente distribuído com média μ e desvio-padrão dado pela Equação 5.

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Equação 5}$$

Tem sido assumido que a distribuição de parâmetros ou características de qualidade em geral é normal. Entretanto, os resultados estarão aproximadamente

corretos mesmo se a distribuição não for normal, por causa do Teorema Central do Limite (MONTGOMERY, 2000).

Na prática, normalmente não serão conhecidos μ e σ . Portanto, eles devem estimados de amostras preliminares ou subgrupos tomados quando o processo for considerado sob controle. Esta estimativa deve ser baseada em ao menos 20 a 25 amostras, senão os limites obtidos não serão confiáveis. Suponha que m amostras estejam disponíveis, cada uma contendo n observações sobre a característica de qualidade. Tipicamente n é pequeno, contendo de 4 a 6 observações. Esse pequeno tamanho de amostra resulta da construção de subgrupos racionais e do fato de que a amostragem e os custos de inspeção associados com medições de variáveis são relativamente grandes (MONTGOMERY, 2000).

Se $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_m$ é a média de cada amostra, então o melhor estimador de μ , a média do processo, é dada pela Equação 6.

$$\bar{\bar{x}} = \frac{(\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m)}{m} \quad \text{Equação 6}$$

Assim, $\bar{\bar{x}}$ é usado com a linha central do gráfico X para construir os limites de controle, é necessária uma estimativa do desvio-padrão que pode ser obtida ou do desvio-padrão ou da amplitude das m amostras. A amplitude média das amostras é dada pela Equação 7.

$$\bar{R} = \frac{(R_1 + R_2 + \dots + R_m)}{m} \quad \text{Equação 7}$$

Onde R_1, R_2, \dots, R_m é a diferença entre a maior e a menor observação de cada amostra.

Com isso, é possível apresentar as fórmulas para construção dos limites de controle do gráfico X (Equação 8).

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2\bar{R}$$

Linha central: $\bar{\bar{x}}$ Equação 8

$$LCL = \bar{\bar{x}} - A_2\bar{R}$$

A constante A_2 é tabulada para vários tamanhos de amostra.

Para monitoramento da variabilidade do processo, pode ser utilizado o gráfico R, cujos limites de controle e linha central são dados pela Equação 9.

$$UCL = D_4\bar{R}$$

Linha central: $\bar{\bar{R}}$ Equação 9

$$LCL = D_3\bar{R}$$

As constantes D_3 e D_4 também são tabuladas para vários tamanhos de amostra.

Quando amostras preliminares são usadas para construir \bar{X} e R , é comum chamar os limites de controle obtidos de limites de controle de teste (“trial control limits”). Eles permitem determinar se o processo estava sob controle quando as m amostras iniciais foram selecionadas (MONTGOMERY, 2000).

Para isto, deve-se plotar os valores de \bar{X} e R de cada amostra sobre os gráficos e analisar os resultados. Se todos os pontos estiverem dentro dos limites de controle estabelecidos e se não surgir nenhum comportamento sistemático, conclui-se que o processo estava sob controle no início e que os limites de controle de teste são aplicáveis para a produção corrente e futura.

Se o processo não se apresentar sob controle, será necessário revisar os limites de controle de teste. Isto é feito examinando cada ponto fora de controle em busca de causas especiais. Se uma causa especial é encontrada, o ponto é descartado e os limites de controle de teste são recalculados. Então os pontos que permaneceram devem ser reexaminados. Note que os pontos que inicialmente estavam sob controle

agora podem estar fora devido ao novo cálculo dos limites. Esse processo é continuado até todos os pontos estarem sob controle (MONTGOMERY, 2000).

Em alguns casos, pode não ser possível encontrar uma causa especial para um ponto que fique plotado fora de controle. Neste caso existem dois caminhos que podem ser seguidos: o primeiro é eliminar o ponto como se a causa especial tivesse sido encontrada (o que não existe justificativa analítica para isto), a outra é considerar que os pontos fora dos limites de controle tenham sido obtidos de um processo fora de controle (MONTGOMERY, 2000).

Em geral, quando muitas das amostras iniciais estão fora dos limites de controle, é mais interessante concentrar-se no modelo formado por estes pontos. Normalmente, a causa especial associada a um modelo de pontos fora de controle é nitidamente fácil de identificar. Remover do processo a causa deste problema resultará em melhoria do processo (MONTGOMERY, 2000).

Uma vez que o gráfico R indique que a variabilidade do processo está sob controle, passa-se à construção do gráfico X (MONTGOMERY, 2000).

Geralmente, o uso efetivo de gráficos de controle requer revisão periódica dos limites de controle e linha central. Essa revisão pode ser feita a cada semana, mês ou a cada 25, 50 ou 100 amostras (MONTGOMERY, 2000).

4.3.7 Estimativa da capacidade do processo

Apesar de um processo estável apresentar previsibilidade, é possível que um processo com variabilidade controlada e previsível produza itens defeituosos. Logo, não é suficiente simplesmente colocar e manter um processo sob controle. É fundamental avaliar se o processo é capaz de atender às especificações estabelecidas a partir das necessidades dos clientes. Esta avaliação constitui o estudo de capacidade do processo.

Entretanto, se o processo não é estável, ele possui um comportamento imprevisível e, portanto, não faz sentido avaliar a sua capacidade (WERKEMA, 1995).

Um processo pode não ser capaz por apresentar elevada variabilidade ou por ter a média deslocada em relação ao ponto médio dos limites de especificação (valor

nominal). Isto pode ser avaliado através de análise gráfica ou por índices de capacidade (WERKEMA, 1995).

A análise gráfica consiste em montar um histograma com os resultados das observações e avaliar se o processo se mostra centrado no valor nominal e se todos os dados estão localizados dentro da faixa de especificação. A distância entre as observações extremas e os limites de especificação funciona como uma margem de segurança para a operação do processo. Também é importante que o histograma tenha uma distribuição aproximadamente simétrica, lembrando a forma da distribuição normal (WERKEMA, 1995).

Para analisar a capacidade através dos índices de capacidade, é necessário que o processo esteja sob controle estatístico e que a variável de interesse tenha distribuição próxima da normal (WERKEMA, 1995).

Caso a variável de interesse tenha uma especificação bilateral (USL e LSL), o índice de capacidade C_p é definido pela Equação 10.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad \text{Equação 10}$$

O índice C_p relaciona aquilo que se deseja produzir (USL-LSL), que corresponde à variabilidade permitida ao processo, com a variabilidade natural do processo (6σ) (WERKEMA, 1995).

Como σ normalmente é desconhecido, pode-se usar σ' como estimativa. Assim, a estimativa C_p' de C_p é calculada através da Equação 11, onde σ' é calculado conforme a Equação 12.

$$C_p' = \frac{USL - LSL}{6\sigma'} \quad \text{Equação 11}$$

$$\sigma' = \frac{R}{d_2}$$

Equação 12

O valor mínimo exigido de C_p para atingir a meta de 3σ é 1,33. O inverso do valor encontrado para C_p indica a porcentagem da faixa de especificação que está sendo utilizada pelo processo (WERKEMA, 1995).

Se o processo não estiver centrado no valor nominal, deve ser utilizado o índice C_{pk} . Este índice permite avaliar se o processo está sendo capaz de atingir o valor nominal de especificação, já que ele leva em consideração o valor da média do processo. Assim, o índice C_{pk} é interpretado como uma medida da capacidade real do processo, enquanto o índice C_p é uma medida de capacidade potencial. O índice C_{pk} é definido por:

$$C_{pk} = \text{MIN}\left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right]$$

Equação 13

Também aqui, caso a média e o desvio-padrão do processo sejam desconhecidos, eles devem ser substituídos pelas estimativas \bar{x} e σ' (WERKEMA, 1995).

Caso haja apenas um limite de especificação, o índice de capacidade é calculado por uma das partes da fórmula anterior.

Caso o material não atinja o nível de qualidade desejado, aqui considerado de 3σ , é possível calcular o nível de qualidade atingido através da Equação 14, onde, caso a propriedade esteja centrada no valor médio do intervalo, basta calcular apenas uma das hipóteses.

$$Q = \text{MIN}\left[\frac{USL - \mu}{\sigma}, \frac{\mu - LSL}{\sigma}\right]$$

Equação 14

4.4 Controle de qualidade na produção de concretos estruturais

Os concretos de cimento Portland são um dos materiais de construção civil com controle de qualidade mais bem estabelecido e normalizado pelos preceitos estatísticos discutidos.

TAYLOR (1991), abordando genericamente o controle de qualidade para materiais de construção, exemplifica o controle da resistência à compressão de concretos e que também pode ser aplicado a quaisquer outras propriedades de materiais, que variem segundo uma distribuição normal de Gauss.

No exemplo citado, é considerada a produção de concretos com resistência característica (f_{ck}) igual a 30 MPa, desvio-padrão (s_d) de 6 MPa e com 5% de falhas permitidas. Neste caso, considerando que a variável normal reduzida (z) é igual a 1,64, tem-se como resistência de dosagem (f_{cd}) o valor aproximado de 40 MPa, calculado através da Equação 15.

$$f_{cd} = f_{ck} + z \times s_d \quad \text{Equação 15}$$

Considerando-se que os resultados de resistência, neste exemplo, foram obtidos pela média de 4 corpos-de-prova (n) para cada amostra, tem-se como resultado de erro-padrão (ϵ) o valor de 3 MPa, calculado através da Equação 16.

$$\epsilon = \frac{s_d}{\sqrt{n}} \quad \text{Equação 16}$$

Os limites de controle superior (UCL) e inferior (LCL) são calculados e representados no gráfico em função da porcentagem de resultados falhos permitidos, estipulados neste exemplo em 5%, sendo este um valor normalmente adotado para tal propriedade de concretos, cujos resultados foram, respectivamente, 44,9 MPa e 35,1 MPa, calculados conforme a Equação 17.

$$UCL(LCL) = f_{cd} \pm z \times \varepsilon \quad \text{Equação 17}$$

Ou seja, desta forma, apenas um resultado de resistência à compressão em cada 20 poderia estar fora do intervalo entre 35,1 MPa e 44,9 MPa. Mais de um resultado fora deste intervalo caracteriza um processo fora de controle.

Poderia ser representado também no gráfico de controle os limites relativos a 10% de falhas, como “warning limits”, ou um outro valor de falhas que fosse interessante, utilizando-se para isso os valores de z correspondentes (Tabela 58).

Tabela 58: Valores de z para diversas porcentagens de falhas permitidas.

% de falhas permitidas	Valores de z
16	1
10	1,28
5	1,64
2,5	1,96
2	2,05
1	2,33

Metodologia semelhante é aplicada na produção de concreto estrutural por diversas normas como a brasileira vigente NBR 12655/96.

4.5 Controle de qualidade em indústrias de argamassas

Não foram localizadas publicações sobre controle de qualidade em indústrias de argamassa. As informações apresentadas neste item foram obtidas através da entrevista de alguns funcionários de fábricas de argamassas industrializadas que tem como rotina de trabalho o controle tecnológico de seus produtos. Não houve resposta formal à consulta feita por e-mail a algumas fábricas e não se localizaram dados publicados. Assim, adotou-se entrevistas informais como forma de obtenção das informações a seguir registradas.

Apesar de produzirem produtos para mesma utilização, cada empresa adota um sistema de controle próprio, variando no tamanho dos lotes e amostras, propriedades controladas e intervalos de variação admissíveis.

Como exemplo, é comum as indústrias de argamassas do tipo massa única adotarem como tamanho de lote uma batelada, sendo que o tamanho desta varia de indústria para indústria, por exemplo, de 1000 a 3000 kg. Quando a indústria atinge, com o passar do tempo, um bom controle das propriedades das argamassas e também dependendo do seu volume de produção diário, o tamanho do lote pode chegar a 20 t.

Para cada lote é retirada uma amostra que é ensaiada para as propriedades consideradas principais por cada indústria. Entre estas propriedades, pode-se citar a distribuição granulométrica do agregado, perda de consistência com o tempo e consumo de água. Ensaio de resistência à compressão é realizado, normalmente, duas vezes por mês apenas, junto com a produção de 1 m² de revestimento para verificação da resistência de aderência ao substrato.

Também são armazenadas amostras de, aproximadamente, 500 g, durante 1 a 2 anos, como contra-prova em caso de reclamações por consumidores. Neste caso, é feita uma caracterização mais completa do material.

Em relação aos limites de controle, cada fabricante apresenta na embalagem do produto e catálogos técnicos os limites máximos de cada propriedade que, na verdade, não refletem o desvio-padrão interno da indústria. Alguns destes limites podem ser vistos na Tabela 59.

Tabela 59: Limites de variação de diversas propriedades de argamassas definidos por indústrias de argamassas industrializadas.

Propriedade	Argamassa				
	Quartzolit	Fortaleza	Votomassa	Qualimassa	Argamont
Densidade de massa fresca (kg/ m ³)	1800	1800	1700 a 1800	-	-
Teor de ar aprisionado (%)	13	-	> 18	16 a 20	8 a 18
Retenção de água (%)	92	-	90	90 a 94	90
Umidade de mistura (%)	15	-	16 a 17	14	15
Resistência à compressão (MPa)	-	-	5	4 a 6	4 a 8
Rendimento (kg/m ² /cm)	17	16,1	17	-	17

Quartzolit Reboquit Massa única; Votomassa Múltiplo Uso
Qualimassa tradicional múltiplo uso; Argamont Massa Pronta Mont

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO E CONTROLE DE PRODUÇÃO DE AREIA RECICLADA LAVADA PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

5.1 Premissas e condições de contorno da tese

O panorama nacional da reciclagem de RCC, no Capítulo 2, e a revisão bibliográfica sobre argamassas e controle de qualidade, nos Capítulos 3 e 4, embasam e justificam as seguintes premissas que nortearam o programa experimental desta tese, em prosseguimento aos estudos de MIRANDA (2000):

- o desenvolvimento da produção de argamassas de revestimento de areias recicladas, de resíduos classe A da construção civil no Brasil, é importante para a valorização e o maior consumo de materiais reciclados de RCC no Brasil;
- esse desenvolvimento precisa ser estabelecido por processos diferenciados de produção e de controle de qualidade dos agregados e argamassas, em relação aos existentes nas usinas nacionais;
- esses processos de produção e controle devem promover melhores garantias de desempenho das argamassas ao mercado consumidor, através do fornecimento de areia reciclada lavada, saturada ou de argamassas, em lotes homogêneos, sem isto implicar em elevação considerável dos patamares de investimento e de operação das usinas;
- o controle do teor de finos < 75 µm é um parâmetro fundamental para a geração de areias recicladas para argamassas de revestimento e deve poder ser feito por operações e equipamentos tradicionais do setor de mineração;
- em se tratando de reciclagem para agregados com destinação não estrutural, a variabilidade da natureza dos resíduos classe A deve poder ser controlada por técnicas usuais de classificação e homogeneização, mas que precisam ser avaliadas.

A partir da caracterização inicial de areias recicladas comuns (não lavadas e com alto teor de finos) e do seu respectivo desempenho em argamassas e revestimentos, com consumo fixo de aglomerantes, os seguintes parâmetros de processo foram avaliados, em cinco fases distintas do programa experimental, como resumido na Figura 37, e interpretados, quando cabível, por técnicas estatísticas de controle de processo:

- efeitos de curvas granulométricas normalizadas e da dimensão máxima característica de areias recicladas;
- controle do teor de finos $< 75 \mu\text{m}$ na areia reciclada lavada, através de processo via úmida simplificado por peneiramento e rejeito de partículas $< 0,15 \text{ mm}$ e depois por processo em classificador espiral;
- efeitos da classificação visual de RCC na entrada do processo;
- técnicas para formar lotes homogêneos de areias recicladas.

Assim, o programa experimental desta tese foi evolutivo, tendo sido desenvolvido entre 2002 e 2004, na Usina de Socorro-SP, onde foram geradas todas as amostras estudadas.

O consumo de aglomerantes nas argamassas foi fixado em faixa usual de revestimentos internos e externos, para condições pouco agressivas de exposição, a partir dos resultados de MIRANDA (2000) e princípios racionais de dosagem de SELMO (1989), com testes confirmatórios em condições de campo no início da pesquisa.

Cabe ainda explicitar que:

- não houve etapas adicionais de otimização da composição ou da dosagem de aglomerantes, e a fixação de partidas únicas de cimento e cal apenas ocorreu até a Fase 3 do Programa. Julgou-se oportuno renovar as partidas de cimento e cal, nas Fases 4 e 5, tanto pelo prazo de desenvolvimento da pesquisa ser longo, quanto pela variabilidade dos aglomerantes ser uma condição inerente a processos reais e, portanto, oportuna de ser enfrentada;
- este programa experimental não abrangeu variáveis envolvidas na melhoria da gestão e triagem de resíduos classe A da construção civil, nem objetivou

aprofundar estudos de viabilidade técnica e comercial do processo de reciclagem proposto ao final, no Capítulo 7, pois estes devem ser as próximas etapas da evolução natural deste trabalho.

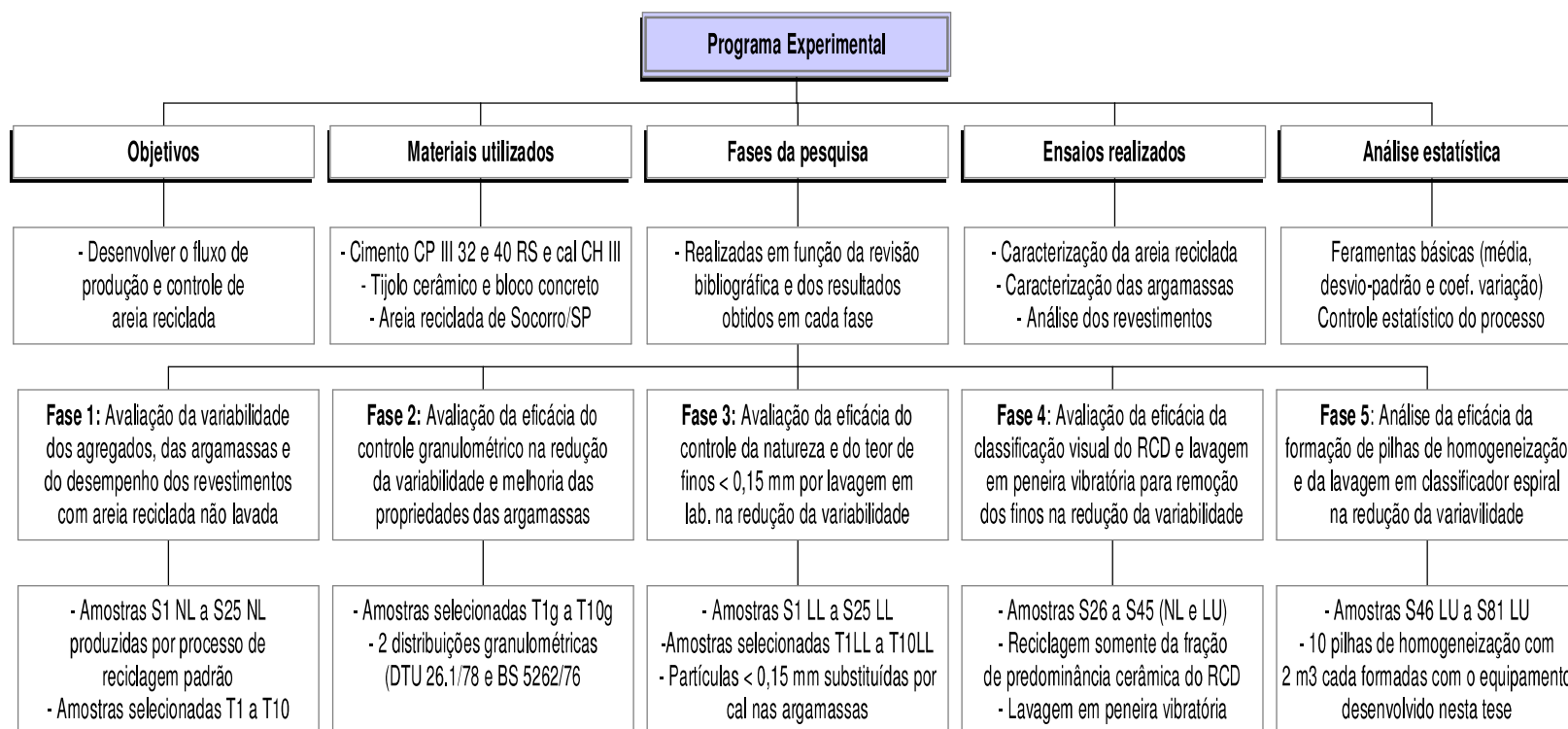


Figura 37: Organograma de resumo do programa experimental da tese.

5.2 Materiais utilizados na pesquisa

5.2.1 Cimentos

Durante as fases principais da pesquisa foram utilizadas duas classes de cimento resistente à sulfatos (tipo RS), sendo esse mais indicado para o uso com agregado reciclado em que possa haver contaminações por gesso de construção.

Nas Fases 1, 2 e 3 (itens 5.4 a 5.6), foi utilizado o cimento CP III 40 RS. A escolha por este tipo de cimento se deveu por ter na época um custo um pouco inferior aos demais tipos na cidade de Socorro/SP, local onde foram desenvolvidas as etapas de campo.

Nas Fases 4 e 5 (itens 5.7 e 5.8), foi utilizado o cimento CP III 32 RS por não ter sido encontrado mais no mercado o cimento anterior.

A fase preliminar de testes com aditivos em laboratório, que consta no Anexo G, foi realizada com o cimento CP II F 32.

Os ensaios de caracterização dos cimentos CP II F 32 e CP III 40 RS foram realizados pela ABCP. A caracterização do cimento CP III 32 RS foi realizada no laboratório do CPqDCC da Escola Politécnica da USP e no laboratório do LCT da Engenharia de Minas da USP. Os resultados de caracterização de todos os três constam no Anexo A. Todos atenderam à normatização específica.

Verificou-se, pelos resultados de caracterização (Anexo A), as seguintes desvantagens no uso do cimento CP III 40 RS: consumo de água bem maior para a pasta de consistência normal e tempo de pega bem inferior em relação ao CP II F 32.

5.2.2 Areias recicladas de RCC

As areias de RCC reciclado foram os únicos materiais utilizados como agregado na composição das argamassas, não sendo feito uso de areia natural.

Todas as amostras estudadas nesta tese foram geradas na usina de Socorro/SP, apresentada no item 2.4.8. Através de algumas visitas iniciais a esta usina percebeu-se que a maior parte do RCC recebido era de cerâmica vermelha de alvenarias de tijolos maciços, o que é explicado pelo grande número de pequenas olarias da região.

Isto foi decisivo na escolha desta usina para realização da pesquisa, uma vez que a fração cerâmica do RCC é a que possui a maior restrição para a aplicação na construção civil e hoje o desenvolvimento de aplicações para este resíduo é a maior necessidade da reciclagem no país.

O RCC era recolhido em caçambas estacionárias de obras da cidade de Socorro/SP e levado para a usina de reciclagem Irmãos Preto Ltda. (descrita no item 2.4.8) pela própria empresa.

Chegando à usina, o RCC, quando necessário, passava inicialmente por um processo de triagem manual. Após isto, era lançado manualmente no britador de mandíbula e, depois, separado em duas frações granulométricas, graúda e miúda, por peneiramento em peneira vibratória inclinada.

De acordo com a fase da pesquisa e como adiante será explicado, estas amostras podem ter passado por processo de moagem em moinhos de martelo, peneiramento secundário, lavagem em betoneira, peneira vibratória ou classificador espiral, ou por controle granulométrico de cada fração seguindo a série normal da ABNT.

Foram utilizados três tipos de amostras de RCC reciclado na pesquisa:

- amostras de areia não lavada (NL): o RCC que chegava na usina, após ser descarregado da caçamba estacionária e triado, era lançado no britador, peneirado e a fração menor que 2,4mm era considerada como amostra NL;
- amostras de areia lavada (LU ou LL): após britado e peneirado, a areia reciclada passava por lavagem em betoneira, peneira vibratória ou em classificador espiral (nestes casos recebendo a sigla LU - areia lavada na própria usina), ou por lavagem em peneira do laboratório (neste caso recebendo a sigla LL – areia lavada em laboratório);
- amostra de areia de composição selecionada: das diversas caçambas de RCC que chegavam na usina, foram selecionados tijolos cerâmicos, concretos e argamassas e britados separadamente.

Os ensaios realizados com cada tipo de areia estão definidos na descrição de cada fase. Cada um dos tipos de areia reciclada recebeu uma sigla de identificação, conforme descrito na Tabela 60.

Tabela 60: Areias recicladas de RCC obtidas na usina de Socorro/SP e utilizadas na pesquisa.

Descrição	Sigla	Fase da pesquisa
Composições selecionadas	T1 a T10	1
Composições selecionadas com granulometria controlada	T1g a T10g	2
Composições selecionadas lavadas em laboratório, com o uso de cal nas argamassas	T1 LL a T10 LL	3
Amostras de areia reciclada não lavada, obtidas após triagem, britagem e peneiramento do RCC	S1 NL a S25 NL S26 NL a S45 NL	1 4
Amostras lavadas em betoneira para revestimentos, cujas argamassas contêm cal na mistura	S1 LU a S25 LU	3
Amostras lavadas em laboratório para ensaios em laboratório, cujas argamassas contêm cal na mistura	S1 LL a S25 LL	3
Amostras lavadas em peneira vibratória, cujas argamassas contêm cal na mistura	S26 LU a S45 LU	4
Amostras lavadas em classificador espiral, cujas argamassas contêm cal na mistura	S52 LU a S81 LU	5

A utilização de resíduos selecionados é interessante por permitir um controle da composição do agregado e, assim, tornar possível verificar a influência da natureza dos resíduos nas argamassas. Entretanto, tão importante é garantir que as técnicas a serem testadas mostrem eficiência em RCC oriundo de construções e demolições, que chegam nas usinas de reciclagem em caçambas estacionárias ou caminhões, uma vez que estes possuem características peculiares.

Os itens 5.2.2.1 e 5.2.2.2 a seguir detalham a forma de obtenção de ambos os tipos de areia recicladas.

5.2.2.1 Amostras de areias recicladas de RCC selecionado

Inicialmente, foram coletadas amostras de RCC selecionado. Como amostras selecionadas entende-se a separação de fragmentos de tijolos cerâmicos, de concretos e argamassas, retirados das caçambas de entulho que chegaram em um prazo

aproximado de 10 dias na usina de Socorro, britados e peneirados, separadamente, na peneira vibratória inclinada com tela de 4,8 mm existente na usina.

Para que tivesse uma reprodução das possíveis composições de RCC que podem ocorrer nas usinas, foram estudadas as composições Tipo 1 a Tipo 10 descritas na Tabela 61.

Estas composições foram obtidas pela mistura de cada um dos três materiais citados em diferentes proporções, sendo que em cada uma existe a predominância de um tipo de material: cerâmico ou concreto/argamassa.

As composições T1, T9 e T10 foram feitas de apenas um de cada tipo de RCC, ou seja, cerâmico, argamassa e concreto, respectivamente. Estas composições foram consideradas importantes para se avaliar a influência de cada natureza de material separadamente, sem influência das demais.

Entre as composições T2 e T8 foi feita uma mistura desses três componentes, variando a proporção entre material cerâmico e concreto/argamassa, sendo que a proporção entre concreto e argamassa é sempre fixa e igual a 1,855. Este valor foi obtido em função da estimativa de consumo de concreto e argamassa nas obras brasileiras, obtidas por SOUZA; FRANCO (1997), a saber:

- consumo de concreto: $0,21 \text{ m}^3/\text{m}^2$ construído = $493,5 \text{ kg/m}^2$ construído (considerando uma densidade do concreto no estado endurecido de 2350 kg/m^3);
- consumo de argamassa: $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^2$ construído = $266,0 \text{ kg/m}^2$ construído (considerando uma densidade da argamassa no estado endurecido de 1900 kg/m^3).

Em relação às características de cada fase selecionada do RCC na usina de Socorro/SP, o concreto selecionado era formado principalmente por lajes e contrapisos. Em quantidade menor tiveram blocos intertravados e em fração insignificante os blocos de concreto, por serem muito pouco usados na região.

A cerâmica vermelha coletada era formada principalmente por tijolos maciços de vedação, produzidos em olarias locais por processo rudimentar (queima

descontrolada). Em fração também insignificante apareceram telhas cerâmicas ou argamassa aderida nos tijolos cerâmicos.

Quanto à argamassa, aproveitou-se a ocasião de chegar na usina uma caçamba inteira composta somente por este material demolido. Ao ser britada, esta argamassa produziu um pó característico da presença de cal na composição, com restos de pintura aderida à sua superfície.

Apesar ter sido recolhida uma amostra de solo da região, esta não foi utilizada na pesquisa por ser considerada uma contaminação que deve ser sempre excluída do RCC, para a produção de argamassas de revestimento e com o controle de qualidade visado neste trabalho.

Materiais como cerâmica branca e pedras ornamentais (como a pedra de São Tomé, por exemplo) não foram considerados importantes na formação de composições já que:

- a presença deles naquela usina é insignificante perto dos outros materiais;
- sua britagem em britadores de mandíbula praticamente não produz agregado miúdo. Como exemplo, cerca de 20 kg de entulho de cerâmica branca produziu menos de 3 kg de material miúdo quando britado no britador de mandíbula tamanho 3020. Para a pedra de São Tomé o resultado foi semelhante.

Todos os três materiais selecionados foram caracterizados conforme os seguintes ensaios: distribuição granulométrica (NBR 7217/87 e a laser), teor de materiais pulverulentos (NBR 7219/87), densidade de massa aparente (NBR 7251/82), densidade de massa dos grãos (NBR 9776/87 e picnômetro de hélio) e absorção de água (NBR 9777/87). Os resultados estão mostrados no Anexo B.

Foram verificados também, mas de forma teórica, por cálculo ponderado e em função da proporção de cada um dos três tipos de entulho, a distribuição granulométrica, o teor de materiais pulverulentos, a densidade de massa e a absorção de água das 10 composições da Tabela 61, estando os resultados no item 6.1.1.

Tabela 61: Composições de agregado de RCC selecionados a serem utilizadas para avaliar a influência da natureza dos resíduos nas propriedades das argamassas.

Tipo de composição	Porcentagem em massa		
	Cerâmico	Argamassa	Concreto
T1	100	0	0
T2	75	9	16
T3	65	12	23
T4	55	16	29
T5	45	19	36
T6	35	23	42
T7	25	26	49
T8	0	35	65
T9	0	100	0
T10	0	0	100

Quando da realização dos testes com controle das partículas < 0,15 mm (Fase 3), os materiais selecionados foram lavados sob uma torneira, utilizando-se uma peneira de tamanho 50 x 50 cm, até a saída de toda a fração de tamanho inferior a 0,15 mm.

5.2.2.2 Amostras de areias recicladas lavadas e não lavadas

As amostras de areias recicladas lavadas e não lavadas foram obtidas na usina de Socorro/SP em diferentes datas e por diferentes processos de reciclagem, de acordo com a fase da pesquisa. Assim, este detalhamento está descrito no item relativo à descrição de cada fase.

a) Dimensionamento da massa mínima das amostras.

O dimensionamento do tamanho de cada amostra foi realizado conforme a teoria de Pierre Gy, detalhada no item 4.1.2, para os seguintes fatores:

- x = teor do mineral de interesse na amostra, em %. Como não foi possível a avaliação do teor de mineral útil, este foi estimado em 99%, considerando como mineral de interesse as fases de cerâmica, argamassa e concreto;
- p_a = densidade de massa específica do mineral de interesse, em kg/l (considerado 2,6 kg/l neste caso);

- p_b = densidade de massa específica da ganga, em kg/l (considerado 1,2 kg/l neste caso);
- p = média ponderada das massas específicas de todas as partículas.

Apesar de algumas fases, como concreto e rochas ou cerâmica e argamassas não estarem totalmente liberadas, elas ocorrem conjuntamente nos grãos e todas são de interesse econômico para a utilização como agregados. Assim, tem-se:

- d = dimensão máxima das partículas em cm (considerado 0,48 neste caso);
- d_0 = dimensão máxima das partículas que assegure uma completa liberação do mineral de interesse, em cm (estimado por microscopia ótica) (considerado 1,5 neste caso);
- $f = 0,5$;
- $h = 0,25$;
- $l = 1$;
- S_a = estimativa do erro total de amostragem expresso com desvio-padrão (considerado 0,0118 neste caso);
- d = dimensão máxima das partículas no material a ser amostrado, normalmente aproximado pela abertura da peneira, em cm, que retém 5% do material (considerado 0,48 cm neste caso);
- W = massa do material a amostrar, em gramas (aproximadamente 3,0 toneladas, já que cada pilha de agregado tinha, aproximadamente, 2 a 3 m³).

Assim, aplicando-se a teoria de Pierre Gy, tem-se como massa mínima da amostra 25 kg. Considerando a necessidade de material para realização de ensaios, foi coletado um mínimo de 40 kg para cada amostra.

b) Procedimento de formação das amostras

A coleta das amostras seguiu a ASTM D75/97 para pilhas de estocagem, explicado no item 4.1.1.

As amostras não lavadas S26 NL a S45 NL (Fase 4) e as amostras lavadas S26 LU a S45 LU seguiram ainda a ASTM 3665/99 quanto ao processo randômico de amostragem, resumido no item 4.1.1, e com os tempos de coleta apresentados no Anexo H, considerando que cada lote tinha, aproximadamente, 2,0 m³ de areia reciclada.

Para as amostras S52 LU a S81 LU (Fase 5), seguiu-se o procedimento descrito no item 5.8. As amostras S46 LU a S51 LU não foram utilizadas na pesquisa por não terem seguido tal procedimento.

5.2.3 Cal

O estudo fez uso ainda de cal hidratada CH III como alternativa de adição plastificante das argamassas em lugar dos finos da areia reciclada ou de incorporadores de ar, com a vantagem de poder contribuir com efeito aglomerante adicional para o desempenho das argamassas.

Três amostras de cal de 3 diferentes partidas foram usadas no trabalho, mantendo-se constante a marca do produto. Este material foi caracterizado quanto à densidade de massa dos grãos, densidade de massa aparente e análise química (Anexo A).

5.2.4 Blocos de concreto e tijolos cerâmicos maciços

Para a verificação do desempenho dos revestimentos produzidos na Fase 3, foram utilizados dois substratos diferentes: alvenaria de bloco de concreto e tijolo cerâmico maciço, ambos sem chapisco. A escolha por estes dois substratos nesta fase se deve às seguintes razões:

- disponibilidade de painéis de alvenaria com ambos os substratos, que faziam parte do fechamento do galpão da usina de Socorro;
- pelo fato do bloco de concreto e do tijolo cerâmico maciço formarem, entre os substratos facilmente encontrados no mercado, alvenarias menos críticas e mais críticas quanto à fissuração, respectivamente, conforme experiência adquirida por este pesquisador durante seu curso de Mestrado.

As alvenarias utilizadas na Fase 3 apresentavam-se bem empoeiradas devido ao grande tempo de existência e atividades no local. Por isso, os blocos de concreto foram vassourados antes da aplicação da argamassa para diminuir a quantidade de pó, sem serem molhados. No caso do tijolo cerâmico maciço, eles foram molhados imediatamente antes da aplicação da argamassa para remover a sujeira e para diminuir a elevada absorção dos blocos, sendo esta uma prática recomendada para este tipo de alvenaria.

Na Fase 4 foi construído um painel de alvenaria de blocos de concreto sem chapisco no laboratório do CPqDCC para aplicação das argamassas. Na Fase 5 utilizou-se de tijolos cerâmicos maciços, tijolos cerâmicos furados e blocos de concreto.

Decidiu-se por não usar chapisco nos substratos, pois, conforme mostrado em MORAIS; SELMO (1999) e em MIRANDA (2000), este é útil para controlar o surgimento de fissuras e, neste trabalho, pretende-se que os revestimentos apresentem bom desempenho mesmo em condições mais adversas.

5.3 Caracterização dos agregados, argamassas e revestimentos

De uma forma geral, os ensaios realizados e seus respectivos procedimentos e normas estão descritos nos itens 5.3.1 a 5.3.3, sendo que nem todos foram feitos em todas as fases da pesquisa, conforme descrito no detalhamento de cada fase (itens 5.4 a 5.8).

5.3.1 Caracterização das areias recicladas

Os ensaios de caracterização realizados nos agregados reciclados seguiram as normas brasileiras vigentes e estão resumidos na Tabela 62.

A determinação da massa específica dos agregados pelo picnômetro de hélio substituiu o método NBR 6508/88 a partir da Fase 4 por este apresentar vantagens como baixo desvio-padrão dos resultados e rapidez na execução.

A determinação da distribuição granulométrica e do teor de finos < 75 µm dos agregados foi realizada conforme as respectivas normas brasileiras e através da granulometria a laser, por serem estas propriedades de grande importância para a

pesquisa, sendo interessante sua caracterização por dois métodos distintos. Entretanto, na análise dos resultados de argamassas e revestimentos, foi utilizado o teor total de finos < 75 µm presente na argamassa, por ser este parâmetro o mais indicado tecnicamente na análise de desempenho de argamassas e revestimentos, como mostrado por SELMO (1989), que é calculado conforme a Equação 18.

Tabela 62: Ensaios de caracterização realizados nos agregados reciclados utilizados na pesquisa.

Ensaio	Método
Densidade de massa específica	NBR 6508/88; Picnômetro de hélio
Distribuição granulométrica	NBR 7217/87; Granulometria a laser
Densidade de massa aparente	NBR 7251/82
Teor de materiais pulverulentos	NBR 7219/87
Absorção de água	NBR 9777/87
Inchamento dos grãos	NBR 6467/87
Teor de sais, íons cloretos e sulfatos solúveis	NBR 9917/87
Análise química	Fluorescência de raios x
Ph	-
Resistividade	-
Impurezas orgânicas	NM 49/01
Porosimetria	Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de absorção de água foi realizado em todas as amostras lavadas e nas amostras não lavadas da Fase 1 removendo-se as partículas < 0,15 mm para evitar coesão do material após compactação e, portanto, influência nos resultados.

5.3.2 Caracterização das argamassas

5.3.2.1 Método de mistura das argamassas

O procedimento de mistura das argamassas, para a realização dos ensaios nos estados fresco e endurecido, explicados nos itens 5.3.2.2 e 5.3.2.3, foi o seguinte: adicionar a água na argamassadeira, adicionar a areia reciclada e bater por 30 segundos, descansar por 9,5 minutos, adicionar o cimento (e a cal, quando for o caso) e bater por 2 minutos.

O descanso por 10 minutos foi para permitir a absorção de água pela areia reciclada. MIRANDA (2000) realizou-se o ensaio de absorção inicial de água nos intervalos de 5, 10 e 30 minutos de contato das amostras com a água. Após 10

minutos o entulho cerâmico, de absorção mais crítica, já havia absorvido cerca de 96% da sua capacidade total de absorção de água.

Este método de mistura é considerado ideal no caso de venda da areia reciclada para produção de argamassas, uma vez que permite a absorção de água pelo agregado (evitando a perda de trabalhabilidade acelerada da argamassa), sem o risco de absorver também parte do cimento da mistura.

5.3.2.2 Caracterização das argamassas no estado anidro e fresco

No estado anidro, foi determinado o teor total de finos < 75 µm da argamassa, que varia em função dos materiais utilizados e da dosagem, conforme a Equação 18.

$$\%f_{\text{arg}} = \frac{1 \times \%f_c + P \times \%f_p + A \times \%f_a}{1 + P + A} \times 100 \text{ Equação 18}$$

Onde:

$\%f_{\text{arg}}$ = total de finos < 75 µm da argamassa seca.

$\%f_c$ = % de finos < 75 µm do cimento, em massa.

P = teor de adição plastificante no traço da argamassa, em relação ao cimento (kg/kg).

$\%f_p$ = % de finos < 75 µm da adição plastificante, em massa.

A = teor de areia reciclada na argamassa, em relação ao cimento (kg/kg).

$\%f_a$ = % finos < 75 µm da areia reciclada, em massa.

O índice de consistência das argamassas no estado fresco foi determinado conforme a norma NBR 13276/95, utilizando-se a mesa de consistência mostrada na Figura 38, apoiada sobre base de concreto.



Figura 38: Ensaio para determinação da consistência da argamassa, conforme a NBR 13276/95.

As determinações das densidades de massa e dos teores de ar aprisionado foram realizadas conforme a NBR 13278/95 (Figura 39).



Figura 39: Determinação da densidade de massa da argamassa no estado fresco, conforme a NBR 13278/95.

O consumo de cimento por m^3 de argamassa foi calculado utilizando-se a densidade de massa das argamassas, conforme a Equação 19.

$$C_c = \frac{\delta_{\text{arg}}}{(1 + P + A + a/c)} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

C_c = consumo de cimento por m^3 de argamassa, em kg/m^3 .

δ_{arg} = densidade de massa da argamassa no estado fresco, conforme a NBR 13278/95.

P = teor de adição plastificante no traço da argamassa, em relação ao cimento (kg/kg).

A = teor de areia reciclada na argamassa, em relação ao cimento (kg/kg).

a/c = relação água/cimento das argamassas (kg/kg).

O consumo de areia reciclada em cada argamassa foi determinado multiplicando-se o consumo de cimento pelo seu teor na mistura, e está expresso em kg/m³.

O custo do m³ das argamassas foi determinado através da Equação 20.

$$\text{Custo} / m^3 = C_c \times \$_c + C_p \times \$_p + C_A \times \$_A \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

Custo/m³ = custo por m³ de argamassa, em R\$/m³.

C_c = consumo de cimento por m³ de argamassa, em kg/m³.

C_p = consumo de cal por m³ de argamassa, em kg/m³.

C_A = consumo de areia reciclada lavada por m³ de argamassa, em kg/m³.

$\$_c$ = preço do kg de cimento, sendo que para o cálculo usou-se R\$ 0,25/kg.

$\$_p$ = preço do kg de cal, sendo que para o cálculo usou-se R\$ 0,15/kg.

$\$_A$ = preço do m³ de areia reciclada lavada, sendo que para o cálculo usou-se R\$ 25/m³.

O custo do m³ da areia reciclada é variável de acordo com o processo de reciclagem utilizado. Considerou-se aqui o preço de venda de R\$25,00/m³, aplicado na usina de Socorro para a areia reciclada não lavada em janeiro de 2005.

5.3.2.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido

5.3.2.3.1 Resistência mecânica

Os corpos-de-prova para todos os ensaios mecânicos de uma mesma argamassa foram moldados de uma mesma porção de mistura, com dimensões de 4 x 4 x 16 cm,

sendo adensados mecanicamente no equipamento ELE mostrado na Figura 40, em uma única camada compactada com 25 golpes automáticos.



Figura 40: Equipamento utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova de dimensões 4 x 4 x 16 cm, utilizados nos ensaios mecânicos de tração na flexão e compressão.

Da moldagem até 7 dias de idade, todos os corpos-de-prova eram mantidos em câmara úmida, cuja umidade relativa permaneceu acima de 95%, sendo que a desmoldagem dos corpos-de-prova foi realizada no quarto dia para que se evitasse danificá-los.

De 7 dias até 21 dias, todos os corpos-de-prova eram armazenados em câmara seca com umidade relativa de $46\% \pm 6\%$ e temperatura de $26\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Após 21 dias, os corpos-de-prova eram levados para a estufa, permanecendo neste local até a idade de 28 dias, para garantir que todos eles seriam ensaiados com 0% de umidade, uma vez que foi verificado durante este trabalho que, após 14 dias na câmara seca, a umidade dos corpos-de-prova variava de 2% a 9%. A temperatura de secagem foi adotada como $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ até a Fase 4, mas depois reduzida para $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ com o intuito de evitar um aumento de microfissuração do corpo-de-prova devido ao calor.

A resistência à tração na flexão foi medida em 3 corpos-de-prova de dimensões de 4 x 4 x 16 cm para cada argamassa, aos 28 dias de idade, ensaiados de acordo com a norma EN 1015-11/93, com velocidade de carregamento de 13 N/s, em uma prensa Emic DL10000. A Figura 41 ilustra este ensaio.



Figura 41: Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm, com vão livre de 10 cm, conforme a EN 1015-1/93 (MIRANDA, 2000).

A resistência à compressão foi medida em 3 corpos-de-prova de dimensões próximas a 4 x 4 x 8 cm para cada argamassa, aos 28 dias de idade, utilizando-se uma das metades de cada corpo-de-prova ensaiado à flexão, segundo o dispositivo ilustrado na Figura 41 e sendo a velocidade de carregamento igual a 100 N/s.



Figura 42: Ensaio de resistência à compressão em metades dos corpos-de-prova de flexão de 4 x 4 cm, sendo 8 cm o comprimento aproximado, conforme a EN 1015-1/93 (MIRANDA, 2000).

5.3.2.3.2 Retração por secagem

A retração por secagem das argamassas foi medida e calculada em analogia à NBR 8490/84, para 3 corpos-de-prova de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm de cada argamassa, moldados manualmente em duas camadas de 25 golpes. Este ensaio também foi realizado em corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm, com distância interna dos pinos de 13,1 cm, devido à baixa resistência das argamassas da Fase 5.

Da moldagem até 7 dias de idade, todos os corpos-de-prova eram mantidos em câmara úmida, cuja umidade relativa permaneceu acima de 95%, sendo que a desmoldagem dos corpos-de-prova foi realizada no quarto dia para que se evitasse danificá-los.

As medidas de retração iniciaram-se aos 7 dias, com os corpos-de-prova totalmente saturados e já desmoldados há 3 dias, no momento em que eram levados para a câmara seca, e foram até 63 dias.

Este procedimento de leitura, embora possa resultar em um pequeno erro por excluir as movimentações volumétricas iniciais devido à liberação de movimento no momento de desforma, garante uma resistência mecânica mais segura para a manipulação dos corpos-de-prova que são normalmente muito frácos.



Figura 43: Aparelho comparativo da NBR 8490/84 usado para medida de retração linear por secagem em corpos-de-prova de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm (MIRANDA, 2000).

5.3.2.3.3 Absorção de água e densidade de massa endurecida

Os ensaios de absorção de água por capilaridade e de densidade de massa no estado endurecido eram realizados em dois a três corpos-de-prova, restantes do ensaio de resistência à tração na flexão, sendo que, para a Fase I, a idade dos corpos-de-prova das composições selecionadas T1 a T10 era de cerca de 5 meses e, para as demais Fases, a idade dos corpos-de-prova era de 2 meses.

Inicialmente, os corpos-de-prova foram secos em estufa a 100°C. Então a face obtida do rompimento do corpo-de-prova à flexão foi nivelada utilizando-se uma

serra de corte diamantada, para que então os corpos-de-prova pudessem ser medidos e pesados.

Após isto, as faces laterais foram seladas com silicone e os corpos-de-prova foram pesados novamente. A face nivelada foi mergulhada em uma bandeja com água (cujo nível era mantido constante e igual a 1 cm) e então foram feitas as medidas da massa dos corpos-de-prova nos tempos 1 minuto, 5 minutos, 10 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas e 24 horas.

5.3.2.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi realizado em corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm da Fase 5 nas idades de 16, 21 e 28 dias, antes da realização dos ensaios mecânicos, utilizando-se o equipamento PUNDIT - Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester - no método de transmissão direta de propagação dos pulsos (Figura 44).

A determinação do módulo de elasticidade desta forma parte do princípio de que a velocidade com a qual um pulso ultrassônico atravessa um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas do material. O PUNDIT gera um pulso ultrassônico de baixa frequência e mede o tempo que este pulso demora para passar de um transdutor para o outro através de um material colocado entre eles.

Uma boa leitura do tempo depende de uma boa calibração do equipamento com a barra padrão e de um bom acoplamento dos transdutores à superfície do corpo-de-prova, sendo para isto normalmente utilizada vaselina. Se o tempo obtido permanece constante, variando em um intervalo de $\pm 1\%$, quando os transdutores são aplicados e reaplicados na superfície do corpo-de-prova, isto é uma indicação de que um bom acoplamento dos transdutores foi obtido.



Figura 44: Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

5.3.3 Execução e análise de desempenho dos revestimentos

Nas Fases 1, 4 e 5, o seguinte procedimento de mistura foi utilizado na preparação das argamassas:

- colocar a mistura anidra de cimento, areia reciclada e cal (quando utilizada) dentro da betoneira de eixo inclinado (capacidade nominal de 200 l) ou em cima de uma chapa metálica (quando se desejava mistura manual);
- adicionar água de amassamento;
- misturar por um minuto na betoneira ou por 10 minutos manualmente;
- deixar o material descansar por 10 minutos (quando misturado na betoneira);
- bater por mais um minuto (quando misturado na betoneira).

Para uma mesma amostra de areia reciclada, foram produzidos diferentes tipos de revestimento, de acordo com a variável que se queria analisar. Assim, foram variados a espessura do revestimento, o método de mistura (manual ou mecânica, no caso dos testes com aditivos descritos no Anexo G), o substrato, o preparo das amostras de areia reciclada (com ou sem lavagem), etc.

Todos os revestimentos foram taliscados, sarrafeados com régua metálica e desempenados por desempenadeira de madeira, sendo que, quando necessário, houve aspersão de água por brocha para facilitar o acabamento.

O controle de fissuração dos revestimentos foi realizado em termos de quantidade e comprimento linear para as fissuras visíveis, por m² de revestimento, até a idade de 3 meses.

Foi realizado também um controle qualitativo da fissuração dos revestimentos, classificando-o, visualmente, em nenhuma, pouco, médio e alto (Figura 45).



(a)



(b)

Figura 45: Exemplos de fissuras: a) fissuras visíveis com revestimento seco; b) painel com muitas fissuras visíveis apenas com o revestimento molhado.

A resistência de aderência à tração dos revestimentos foi caracterizada, inicialmente, conforme a NBR 13528/95 em revestimentos escolhidos, na idade de 28 dias, através de seis corpos-de-prova, utilizando-se um equipamento Dinateste de capacidade de carga 5 kN (Figura 46).

No caso de alvenaria de blocos de concreto, tomou-se o cuidado de não realizar ensaios sobre as juntas de assentamento das alvenarias, como recomendado por CARASEK *et al.* (1999).

Não foi realizado este ensaio em todos os revestimentos em caso de mau desempenho quanto à fissuração, uma vez que a fissuração excessiva pode reduzir os resultados de resistência de aderência.



Figura 46: Ensaio de resistência de aderência à tração, com equipamento Dinatense, em revestimento de areia reciclada em Socorro/SP.

O método do cachimbo tem origem francesa e foi utilizado em revestimentos de argamassa sem pintura por SELMO (1989), a partir dos estudos de POLISSENI (1985).

O teste foi realizado, com 3 cachimbos, nos revestimentos produzidos na Fase 4 da pesquisa, simplificando a amostragem de POLISSENI (1985)..

Os cachimbos foram fixados nos revestimentos, com o auxílio de massa para calafetar, e as medidas realizadas a cada minuto, até 15 minutos, conforme SELMO (1989).

5.4 Fase 1: Avaliação da variabilidade de areias recicladas, de argamassas e do desempenho de revestimentos produzidos pela reciclagem de RCC originais, não lavados e outros selecionados

Os objetivos desta Fase 1 foram:

- fazer uma análise da variabilidade que ocorre nas propriedades dos agregados e das argamassas e analisar o desempenho dos revestimentos produzidos com amostras de areia reciclada coletadas na usina de Socorro/SP, verificando-se quais as variáveis mais influentes nas propriedades das argamassas e uma possível correlação entre elas;

- avaliar a influência da variação da composição do RCC nas propriedades das argamassas.

Para isto, foram utilizados 2 tipos de agregados nesta fase: selecionados e não lavados.

As amostras selecionadas foram obtidas conforme descrito no item 5.2.2.1 e misturadas nas proporções descritas na Tabela 61, formando as 10 composições T1 a T10, pesadas em laboratório.

Foram retiradas 25 amostras não lavadas nesta fase, sendo que foram utilizadas apenas 20 nos testes. As datas de coleta destas 20 amostras foram: 4/9, 20/9, 5/10, 9/11, 16/11 e 26/11 de 2001 e em 7/6, 14/6, 21/6, 28/6, 3/7, 18/7, 26/7, 8/8, 16/8, 23/8, 3/8, 6/9, 26/9 e 4/10 de 2002. Após recicladas, elas foram identificadas com a sigla S1 a S25, seguindo numeração crescente pela data de coleta.

Um fluxograma do processo de reciclagem utilizado para obter estas amostras é apresentado na Figura 47.

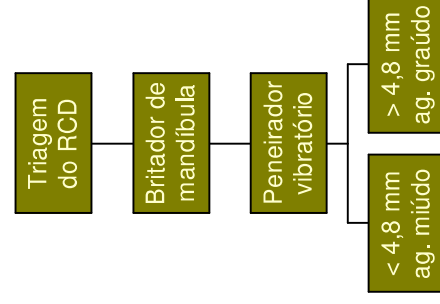


Figura 47: Fluxograma da usina de reciclagem utilizado para obtenção das amostras não lavadas S1 NL a S22 NL, Fase 1.

Algumas amostras apresentaram características diferenciadas das demais durante o preparo, conforme o andamento da pesquisa, e estão assim segmentadas:

- sabe-se que a amostra S16 NL não apresentou resíduo de concreto em sua composição, uma vez que na ocasião da coleta o proprietário da

usina tinha optado em reciclar separadamente a fração de concreto do entulho;

- também as amostras S21 NL e S22 NL foram peneiradas em peneira com tela de 1,2 mm, ao invés de 4,8 mm, já que nesta fase da pesquisa foi decidido testar revestimentos com um material mais fino e lavado na peneira de abertura 0,15 mm.

As propriedades caracterizadas dos agregados, argamassas e revestimentos produzidos nesta fase com as amostras não lavadas estão resumidas na Tabela 63.

Para as 10 composições de agregados e argamassas obtidas misturando-se os materiais selecionados, tem-se:

- as propriedades de absorção de água, massa específica, teor de materiais pulverulentos e distribuição granulométrica das composições foram obtidas algebricamente a partir dos valores obtidos da caracterização isolada dos resíduos de cerâmica, argamassa e concreto;
- as propriedades das argamassas foram obtidas conforme a Tabela 63;
- não foram produzidos revestimentos com as 10 composições de areia reciclada.

Tabela 63: Propriedades de agregados, argamassas e revestimentos caracterizadas durante a Fase I da pesquisa.

Agregados	Argamassas	Revestimentos
Distribuição granulométrica (NBR e a laser)	Relação água/materiais secos total e efetiva para consistência constante	Grau de fissuração
Teor de materiais pulverulento (NBR e a laser)	Relação água/cimento total e efetiva para consistência constante	Aderência à tração
Densidade de massa específica	Densidade de massa fresca	-
Densidade de massa aparente	Consumo de cimento/m ³	-
Absorção de água	Resistência à tração na flexão	-
Impurezas orgânicas	Resistência à compressão	-
Teor de sulfatos	Absorção capilar	-
pH e resistividade	Retração por secagem	-

Para a análise dos resultados foram utilizadas as ferramentas estatísticas descritas no item 5.10, sendo que os resultados estão apresentados no item 6.1.1.

5.5 Fase 2: Avaliação em laboratório da eficácia do controle da distribuição granulométrica de areias recicladas na diminuição da variabilidade das argamassas

O objetivo da Fase 2 foi verificar a eficácia do controle da distribuição granulométrica da areia reciclada na redução da heterogeneidade das argamassas, para as 10 composições descritas na Tabela 61. Nesta etapa não foram utilizadas as amostras não lavadas e lavadas, nem produzidos revestimentos.

Foram definidas duas distribuições granulométricas para esta etapa, uma de granulometria média e a outra fina, classificadas em função do módulo de finura. Estas distribuições granulométricas seguiram as normas DTU 26.1/78 e BS 5262/76, sendo que a primeira se refere à distribuição da argamassa (considerando o cimento) e a segunda se refere à distribuição do agregado (Tabela 64).

O uso de duas distribuições granulométricas tem o intuito de verificar se diferentes distribuições podem causar diferentes resultados de homogeneidade na argamassa.

Tabela 64: Distribuições granulométricas das composições testadas na Fase 2 da pesquisa, sendo a distribuição da norma BS 5262/76 relativa ao agregado e a distribuição da norma DTU 26.1/78 relativa à argamassa.

Tamanho dos grãos (mm)	% passante acumulada	
	Areia fina BS 5262/76	Argamassa média DTU 26.1/78
4,8	100	100
2,4	100	94
1,2	100	76
0,6	80	59
0,3	40	42
0,15	10	25
0,075	5	15
Módulo de finura	1,7	2,04

Esta etapa foi realizada da seguinte forma:

- o material cerâmico, a argamassa e o concreto foram secos em estufa, separados nos tamanhos granulométricos da série de peneira normal e dosados de forma a respeitar as proporções de cada um em cada peneira;
- dosadas as composições para cada uma das séries descritas na Tabela 64, foi definido o consumo de água para se obter uma consistência de 275 ± 15 mm;
- foram realizados os seguintes ensaios nas argamassas: determinação da relação água/cimento e relação água/materiais secos, resistência à tração e resistência à compressão. Os métodos de execução destes ensaios estão descritos detalhadamente no item 5.3;
- os resultados foram analisados utilizando-se as ferramentas estatísticas descritas no item 5.10.

As argamassas produzidas dessa forma foram caracterizadas conforme as propriedades descritas na Tabela 63. Não foram produzidos revestimentos nesta fase.

Os resultados obtidos nesta etapa, bem como sua análise, estão descritos no item 6.1.5.

5.6 Fase 3: Avaliação em laboratório da eficácia do controle da natureza e do teor de finos de areias recicladas, por lavagem em peneira 0,15 mm, na diminuição da variabilidade das argamassas

O controle da natureza e do teor de partículas < 0,15 mm se justifica pelos resultados de MIRANDA (2000), resumidos no Capítulo 3 de levantamento bibliográfico, na qual a natureza e o teor do material passante na peneira de malha 0,15 mm apresentou grande influência no consumo de água das argamassas.

Assim, nesta fase foi verificada a influência somente das partículas < 0,15 mm, sendo que a granulometria foi limitada superiormente na dimensão de 1,2 mm, mas sem preocupação com o controle granulométrico da fração intermediária.

Esta etapa foi realizada tanto para as amostras não lavadas S1_NL a S25_NL quanto para as 10 composições de material selecionado, através do seguinte procedimento:

- peneiramento das amostras na peneira de abertura de malha 1,2 mm;
- lavagem em peneira de dimensões 50 x 50 cm, em tela com abertura de malha de 0,15 mm, descartando o material inferior a esta dimensão e obtendo-se assim as amostras com a sigla LL;
- secagem em estufa a 100 °C;
- definição do consumo de água das argamassas produzidas, na proporção 1:8 (cimento, areia reciclada) em massa, com as amostras não lavadas (S1_NL a S25_NL) e selecionadas (T1 A T10), sem o uso de cal (resultados da Fase 1);
- definição do consumo de água das argamassas produzidas, na proporção 1: 1: 8 (cimento, cal, areia reciclada) em massa, com as amostras de lavadas S1_LL a S25_LL e selecionadas (T1_LL A T10_LL), com o uso de cal;
- realização dos ensaios nos estados fresco e endurecido, descritos na Tabela 65;
- realização de painéis de revestimento em campo, na usina de Socorro/SP, utilizando-se algumas das amostras S1_LL e S25_LL, lavadas em betoneira até que a água se apresentasse límpida, com e sem o uso de cal (Tabela 65);
- análise dos resultados utilizando-se as ferramentas estatísticas descritas no item 5.10.

Tabela 65: Ensaios realizados na etapa de controle da natureza e teor de partículas < 0,15 mm.

Propriedades	Método	Proporção de mistura	Materiais	Adições	Resultados
Relação a/c (para 275 ± 15 mm)	-				
Densidade de massa	NBR 13278/95				
Teor de ar aprisionado	NBR 13278/95	areia seca, 1:1:8 com cal ou 1:8 sem cal	Cimento CP III 40 RS, amostras S1 a S25 de Socorro, NL e LL, e as 10 composições	Com e sem cal	Item 6.3.2
Consumo de cimento por m ³	-				
Resistência à tração na flexão	EN 1015 -11/93				
Resistência à compressão					
Retração por secagem	NBR 8490/84	1:1:8, areia seca, com cal		Com cal	Item 6.3.3
Absorção capilar em cps	-	1:1:8, areia seca, com cal	Cimento CP III 40 RS, composições		
Aderência à tração	NBR 13528/95	1:1:8, areia seca, com cal	Cimento CP III 40 RS, amostras S1 LL a S25 LL de Socorro/SP	Com cal	Item 6.3.4
Controle de fissuras	-				

A lavagem em betoneira das amostras seguiu o seguinte procedimento:

- lançamento da areia reciclada com água em excesso na betoneira;
- mistura por aproximadamente 20 segundos;
- desligamento da betoneira e remoção da água em excesso, junto com o material em suspensão;
- preenchimento com água novamente e nova repetição do ciclo, até que o material se apresentasse visualmente limpo (tempo sempre superior a 30 minutos).

Os resultados desta fase foram comparados com os resultados obtidos para argamassas sem controle das partículas < 0,15 mm (Fase 1) e estão descritos no item 6.3.

5.7 Fase 4: Avaliação em campo da eficácia da classificação visual de RCC de natureza cerâmica ou mista, com e sem lavagem em peneira de 0,15 mm, na diminuição da variabilidade das argamassas

Foi testada nesta fase a eficácia da técnica de classificação visual do RCC e reciclagem separada das frações de natureza cerâmica daqueles de origem em concretos e argamassas.

A classificação visual tem sido utilizada em usinas de reciclagem de RCC brasileiras, conforme mostrado no item 2.4 de levantamento bibliográfico, com o intuito de utilizar a fração cinza do RCC (concretos, blocos de concretos, pisos intertravados e argamassas), na produção de blocos de concreto para vedação, enquanto a fração cerâmica é aplicada para sub-bases de pavimentos.

Uma vantagem que esta técnica pode apresentar e que, até o momento, não foi verificada em campo, é a possibilidade de diminuição da variabilidade das argamassas produzidas. Isto porque RCC de diferentes naturezas, depois de reciclados, produzem agregados com diferentes teores de finos, granulometrias, absorções, durezas e formas e a variação dessas propriedades dos agregados pode causar variação nas propriedades das argamassas, conforme demonstrado por MIRANDA (2000) e ainda avaliado na Fase 1 desta pesquisa.

Uma outra vantagem desta técnica é que ela permite utilizar a fração cinza do RCC para usos considerados mais nobres, como para produção de concretos com ou sem fins estruturais, ou para outras finalidades, como produção de blocos de vedação, acertos das propriedades de outros agregados reciclados, etc.

A aplicação dessa técnica em usinas é fácil, não sendo necessários investimentos em equipamentos, nem o uso excessivo de mão-de-obra. São necessários apenas locais separados para armazenamento de cada uma das duas fases do RCC e um pequeno treinamento dos funcionários para definir corretamente o que será considerado cerâmico e o que será considerado concreto.

Do ponto de vista operacional, não se considerou adequado realizar testes com composições fixas de RCC cerâmico e de concreto, uma vez que isto poderia causar problemas operacionais na usina pela ausência temporária de uma das fases. Além disso, pelas visitas feitas a maioria das usinas de reciclagem brasileiras, pode-se perceber que o resíduo cerâmico é predominante em volume em relação à fração cinza, mas com menores alternativas de utilização (atualmente somente para sub-bases).

Paralelamente a isto, foi modificado o processo de reciclagem do RCC com os seguintes intuitos: diminuir a variabilidade do material e melhorar sua qualidade quanto à presença de contaminações.

Assim, foi incluído no processo de reciclagem um moinho de martelos de pequeno porte e um sistema de lavagem do agregado reciclado, em peneira vibratória inclinada, com despejo posterior do material em um tanque de imersão. A Figura 48 esquematiza o processo de reciclagem adotado nesta fase. Na Figura 49 são apresentadas fotos do processo “in situ”.

A análise da eficácia dessa técnica foi realizada em campo, na usina de Socorro, da seguinte forma:

- os RCC recebidos na usina de reciclagem de Socorro/SP foram classificados visualmente em A (aqueles com predominância de material cinza na composição) e B (aqueles com predominância de material cerâmico);
- o material diário classificado como tipo B foi reciclado no britador de mandíbulas e peneirado em peneira vibratória com duas telas: 4,8 mm e 30 mm;
- a fração maior que 30 mm foi reservada como agregado graúdo;
- a fração menor que 4,8 mm foi utilizada como agregado para argamassa de assentamento. Desta fração retiravam-se as amostras não lavadas S26 NL a S45 NL conforme as normas ASTM D 75/97 e ASTM D 3665/99;

- o material entre 4,8 mm e 30 mm foi moído em um moinho de martelos com grelha de 1,2 mm e levado para uma peneira vibratória a úmido com duas telas: 1,2 mm e 0,15 mm;
- a fração retida na tela 1,2 mm retornava para o moinho. O material menor que 0,15 mm constituía o lodo da lavagem e era descartado. O material entre 1,2 mm e 0,15 mm caía dentro de uma caçamba de entulho cheia de água (usada como tanque de imersão) para remoção do restante do material pulverulento presente no entulho e da matéria orgânica;
- do interior desta caçamba eram removidas as amostras S26 LU a S45 LU, conforme a ASTM D 75/97 e a ASTM D 3665/99. Foram coletadas cinco amostras por semana, durante quatro semanas, no mês de novembro de 2003, lavadas e não lavadas, totalizando vinte amostras de cada tipo.

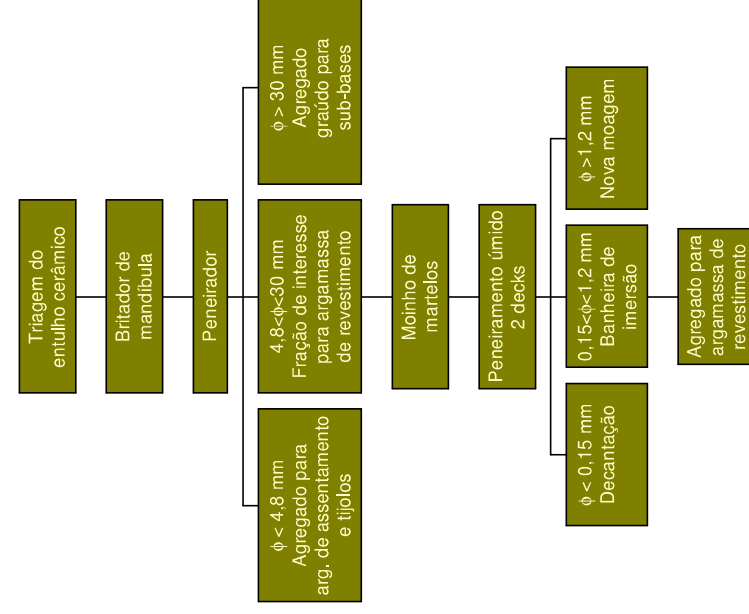


Figura 48: Fluxograma do processo de reciclagem utilizado na Fase 4 da pesquisa.



(a)



(b)



(c)

Figura 49: Processo de reciclagem adotado na Fase 4 da pesquisa para obtenção das amostras S26 a S45. a) Alimentação manual, britagem, peneiramento, moagem e peneiramento a úmido. b) Lado esquerdo: amostras NL. Lado direito: caçambas utilizadas como tanque de imersão dos materiais provenientes do peneiramento a úmido (areia lavada e lodo). c) “Chuveirão” utilizado para peneiramento a úmido e lavagem dos agregados provenientes do moinho.

O processo de lavagem em peneira vibratória foi adotado nesta fase por não ter disponível no momento uma outra forma de lavagem em campo que acompanhasse a produção da usina.

Nesta fase, diferente do que foi feito nas fases anteriores, ao invés de se fixar a consistência das argamassas, foi fixada a relação água/cimento total dos dois tipos de amostras: não lavadas (NL) e lavadas (LU).

Para isto, foram feitos testes preliminares de consistência nas cinco primeiras amostras (S26 a S30) que resultou na fixação da relação água cimento/total em 2,5 e 2,6, respectivamente, para as amostras S26 a S45, NL e LU. Os ensaios realizados com estas amostras estão descritos na Tabela 66.

Outro detalhe importante é que cada caçamba de RCC com predominância cerâmica era despejada ao lado das demais e considerada uma amostra. Durante a obtenção das amostras nas Fases 1 e 3 (S1 a S25), as caçambas de entulho eram despejadas uma sobre as outras, ajudando na homogeneização dos resíduos. Ou seja, Na Fase 4 utilizou-se um procedimento mais crítico quanto à variabilidade.

Tabela 66: Ensaios realizados durante a Fase 4 da pesquisa.

Propriedades	Proporção de mistura	Materiais	Adições	Resultados
Granulometria		LU e NL		
Teor finos < 75 µm		LU e NL		
FRX		9 amostras LU		
Dens. de massa específica		Todas LU		
Dens. de massa aparente seca	-	Algumas NL	-	Item 6.4.1
Dens. de massa aparente úmida		LU e NL		
Absorção de água		LU somente		
Consistência (rel. a/c total fixa)		LU somente		
Densidade de massa				
Teor de ar aprisionado	1:8 (amostras NL) e 1:1:8 (amostras LU), areia seca	Cimento CP III		
Consumo de cimento por m³		32 RS, amostras S26 a S45 de Socorro/SP, LU e NL	Com cal nas amostras LU	Item 6.4.2
Resistência à tração na flexão				Item 6.4.3
Resist. compressão				
Fissuração		Cimento CP III		
Absorção capilar	1:1:8 LU	32 RS, 9 amostras de areia reciclada	Cal	Item 6.4.4
Resist. de aderência				

5.8 Fase 5: Avaliação em campo da eficácia da lavagem em classificador espiral e homogeneização de areias recicladas, na diminuição da variabilidade das argamassas

A última alternativa testada para a obtenção de um processo controlado de produção de argamassas com areia reciclada foi a formação de pilhas de homogeneização de agregados reciclados lavados.

Conforme mostrado no item 2.9.9 do levantamento bibliográfico, a formação de pilhas de homogeneização é um processo já utilizado em diversas usinas de produção de minérios e até de cimentos, onde minerais diferentes são misturados de forma controlada para se obter um produto final com propriedades pré-definidas.

Assim, espera-se como resultado que a pilha de homogeneização aja diretamente na diminuição da variabilidade da natureza do RCC, diluindo a influência de resultados extremos e aproximando as propriedades dos agregados e das argamassas para um valor médio, justificando a avaliação de sua eficácia em RCC.

Existem diversas técnicas para formação dessas pilhas e diversos tipos de pilha, como a longitudinal e a circular, discutidas no item 2.9.9.

Nesta pesquisa, como o RCC não pode ser separado totalmente em suas naturezas para depois elas serem homogeneizadas, foi necessário adotar um procedimento simplificado cuja eficiência é desconhecida.

Sendo assim, com base na revisão bibliográfica realizada e nos resultados obtidos na Fase 4, foi aplicado o seguinte método de homogeneização:

- as caçambas de RCC que chegaram na usina foram despejadas de forma aleatória, sem ser feita a classificação visual;
- o RCC foi reciclado conforme o processo apresentado na Figura 48, sendo que, após a moagem no moinho de martelos, o material foi lavado em um classificador espiral com as seguintes especificações:

rosca de 20 cm de diâmetro e 25 rpm, comprimento de 3,40 m e inclinação de 24° (Figura 50);

- após a lavagem, o material caía no homogeneizador desenvolvido nesta tese que, com seu movimento radial, descarregava a areia reciclada em camadas, formando uma pilha com as seguintes características: 3 m de comprimento, 1 m de altura, base média de 1,3 m, número de camadas aproximadamente igual a 1900;
- após a formação de uma pilha, eram retiradas 3 amostras de aproximadamente 60 kg para realização dos ensaios descritos na Tabela 67, que correspondiam a 3 seções transversais da pilha, do lado esquerdo, centro e direito, descartando-se as extremidades. Estas amostras foram identificadas em número sequencial a partir de S52 LU (Pilha 3) até S81 LU (Pilha 12), conforme Figura 51. Depois era retirada uma amostra de 150 kg para execução de revestimentos;
- após remoção das amostras, o material restante era removido e iniciava-se uma nova pilha. A maior parte deste material removido foi utilizada para aplicação como revestimento no asilo da cidade de Socorro/SP;
- foram formadas 10 pilhas cônicas de agregados reciclados lavados, cada uma com cerca de 2 m³ de material. Cada pilha formada com esse volume equivale à reciclagem de, aproximadamente, 20 m³, ou 8 caçambas de 2,5 m³.

A utilização nesta fase de um classificador espiral para a lavagem areia reciclada, ao invés da peneira vibratória, foi resultado:

- do levantamento bibliográfico realizado (item 2.9.8) que mostrou ser este o equipamento mais apropriado para esta finalidade;
- da realização da Fase 4, onde a lavagem da areia reciclada em peneira vibratória mostrou ser insatisfatória mesmo para pequenos volumes de produção;
- da possibilidade de se obter um equipamento deste com baixo custo.

Tabela 67: Ensaio em realização na Fase 5 da pesquisa.

Propriedades	Proporção de mistura	Materiais	Adições	Resultados
Granulometria		NBR: 30 amostras LU Laser: 10 amostras LU		
Teor de materiais pulverulentos		30 amostras LU		
Densidade de massa específica		10 amostras LU		
Densidade de massa aparente seca	-	30 amostras LU	-	Item 6.5.1
Teor de umidade		6 amostras instantâneas		
Absorção de água		30 amostras LU		
Sais e sulfatos solúveis		10 amostras LU		
Consistência (para uma relação a/c total fixa)				
Densidade de massa fresca				Item 6.5.2
Teor de ar aprisionado				
Consumo de cimento por m ³				
Resistência à tração na flexão	1:1:8, areia seca	Cimento CP III 32 RS, amostras S52 a S81 LU (Pilhas P3 a P12) de Socorro/SP	Cal	
Resistência à compressão				
Módulo de elasticidade dinâmico				
Densidade de massa endurecida				Item 6.5.3
Absorção capilar				
Retração por secagem				
Porosimetria por intrusão de mercúrio		10 amostras LU (uma de cada pilha)		
Resist. de aderência	1:1:8, areia seca	Cimento CP III 32 RS, Pilhas P3 a P12	Cal	Item 6.5.4
Fissuração				



Figura 50: Classificador espiral utilizado na Fase 5 da pesquisa.

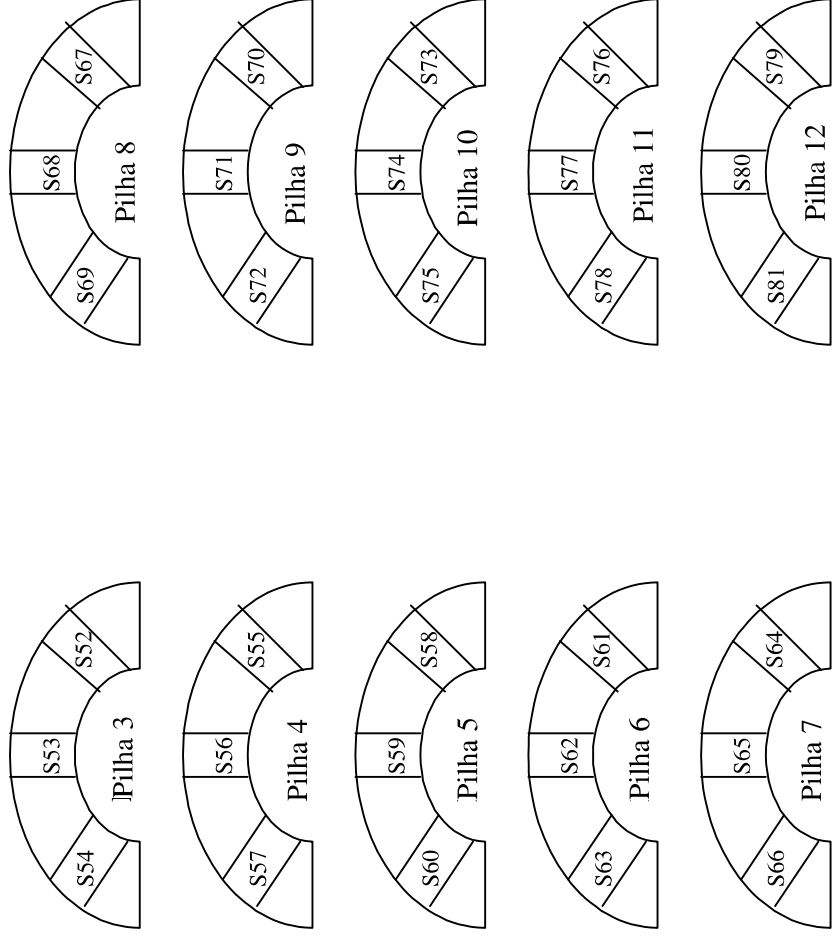


Figura 51: Localização de cada amostra nas pilhas de homogeneização.

Após obtenção e caracterização das amostras, o material excedente foi utilizado para aplicação como revestimentos de duas formas distintas.

Uma delas consistiu na aplicação de 10 amostras de areia como revestimentos, uma de cada pilha com exceção da P6, mais uma de referência de areia natural, em um substrato de bloco de concreto, com e sem chapisco. Cada painel formado tinha uma área de 1 m², conforme ilustrado na Figura 52.

E	1		2		3		4		E
	P3	P4	P5	P7	Sem chapisco P8 P9		P10	P11	
E	P3	P4	P5	P7	Com chapisco P8 P9		P10	P11	P12

1 m

Figura 52: Desenho esquemático da aplicação de argamassas com as amostras de areia reciclada das pilhas P3 a P12 na usina de Socorro/SP em substrato de bloco de concreto.

Todas as argamassas foram aplicadas na proporção 1: 1: 10, massa úmida, sarrafeadas e despenadas na espessura de 1,5 cm, controlando-se a umidade para acerto da dosagem. Como o agregado já se encontrava encharcado devido ao processo de lavagem, não foi necessário deixá-lo em descanso durante 10 minutos. Com isso, o processo de mistura consistiu apenas em misturar durante 5 minutos em betoneira.

Foram feitos as seguintes caracterizações das argamassas aplicadas como revestimentos: densidade de massa fresca, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, retração por secagem.

A outra forma de aplicação das argamassas foi em um asilo da cidade de Socorro/SP. O material foi aplicado pelo pedreiro da obra, na dosagem 1: 1,5: 8 (cimento CP III 32 RS, cal CH III e areia reciclada lavada), em volume úmido, em todas as paredes internas e externas da obra e nos tetos, em substrato de tijolo

cerâmico maciço e furado, sendo que parte das paredes internas foi revestida com material cerâmico. A espessura utilizada variou em função da necessidade de acertar o prumo da parede, chegando a até 4 cm.

As argamassas aplicadas no asilo apenas sofreram um acompanhamento do seu desempenho quanto à fissuração e resistência superficial.



Figura 53: Paredes externas do asilo de Socorro/SP revestido com argamassa de RCC deste projeto.

5.9 Propriedades a serem controladas e limites de especificação

Uma parte fundamental desta pesquisa consiste em definir quais propriedades devem ser controladas para se produzir argamassas homogêneas ao longo do tempo e qual o intervalo de variação permissível.

Considerando-se que as propriedades a serem controladas serão consideradas todas variáveis e não atributos, torna-se necessário definir os limites de projeto, superior e inferior se for o caso, de cada uma.

A partir do domínio da tecnologia de argamassas de revestimento e de agregados, é possível apontar algumas propriedades que deverão, obrigatoriamente, ser controladas, mas que não necessariamente já têm definidos os limites de projeto, seja por normas ou por pesquisas precedentes.

Assim, alguns dos limites de controle adotados como meta desta pesquisa foram baseados em normas nacionais e estrangeiras. Outros foram fixados a partir dos resultados que foram sendo obtidos nesta pesquisa.

SELMO (1989) propõe dois parâmetros para a dosagem de argamassas: o teor total de finos < 75 µm e a relação agregado/cimento.

O primeiro parâmetro citado tem o intuito de controlar a trabalhabilidade da argamassa no estado fresco e sua retração por secagem após endurecida. Sabe-se também que grandes alterações neste teor podem causar alterações na resistência mecânica por influenciar no consumo de água da argamassa, no volume e tamanho dos poros e na microfissuração. Em revestimentos, alterações no teor de finos menores que 75 µm altera sua resistência superficial e a aderência ao substrato.

Como mostrado nos Capítulos 2 e 3, algumas normas limitam o teor de finos de areias naturais para argamassas de revestimento em 5%. Na proporção 1: 1: 8 em massa seca (cimento, cal, areia), isto equivaleria ao teor total de finos < 75 µm na argamassa de 24%, sendo classificada como média conforme LAHUERTA; MONTERDE (1984) e estando abaixo do teor de 25% recomendado por MIRANDA (2000). Assim, este valor foi inicialmente adotado.

A relação agregado/cimento influencia diretamente a resistência mecânica da argamassa. Aliás, várias propriedades no estado endurecido das argamassas possuem correlação entre si, como a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade. Assim, quanto à resistência mecânica, pode-se fazer o controle apenas ou da resistência à tração ou da compressão.

Cada uma dessas duas propriedades possui suas particularidades. A resistência à compressão normalmente possui menor coeficiente de variação e boa correlação com outras propriedades. A resistência à tração tem a vantagem de poder ser verificada na própria usina, sendo desnecessários grandes investimentos ou terceirizar o serviço. Além disso, é citada por pesquisadores como MIRANDA (2000) e VEIGA (2003) como sendo uma propriedade importante no controle da fissuração dos revestimentos de argamassa. Ambas possuem referências de intervalos de valores em normas estrangeiras. Assim, decidiu-se inicialmente trabalhar com as duas propriedades para, posteriormente, verificar qual a mais indicada.

Como pode ser visto na Tabela 50, a prEN 998-1/93 considera que argamassas com resistência à compressão entre 3,5 MPa e 7,5 MPa pertencem ao mesmo grupo, ou seja, um intervalo de variação de $\pm 2,0$ MPa em relação à média. Entretanto, este

pesquisador considera este intervalo um pouco amplo, sugerindo um que seja de $\pm 1,5$ MPa, mas com um valor mínimo de 4 MPa para diminuir a chance de problemas como pulverência superficial e aderência ao substrato. Sendo assim, este intervalo de variação foi adotado como meta para esta propriedade.

A resistência à tração na flexão, apesar de maior variabilidade dos resultados em relação à resistência à compressão, pode ser utilizada como propriedade a ser controlada no estado endurecido, com a vantagem de poder ser determinada na própria usina caso esta tenha um dispositivo apropriado para isto, uma vez que a carga de ruptura geralmente não ultrapassa 120 kg. Como meta, espera-se obter argamassas com resistência sempre menor que 1,5 MPa, como recomendado pela MERUC, mas com resistência mínima de 0,5 MPa.

Também a absorção de água do agregado deve ser controlada. Isto porque, no caso da especificação para o consumidor de um valor fixo de água a ser adicionada à argamassa para seu preparo, uma grande variação na absorção causará problemas na consistência e na resistência, pois produzirão argamassas com diferentes relações água/cimento efetiva.

Além disso, a absorção do agregado, como consequência de sua porosidade, também pode influenciar em outras propriedades, como retração por secagem e absorção capilar.

Neste caso, é menos importante definir quais os limites inferior e superior de absorção e mais importante a amplitude de variação permitida. Como não existem especificações normativas para isto, espera-se que os resultados indiquem qual intervalo deve ser permitido.

Caso o agregado reciclado seja comercializado úmido pré-misturado com algum outro material aglomerante ou plastificante (cimento, cal, etc), é necessário que haja um controle de sua umidade para evitar mudanças na proporção de mistura. Os limites de variação devem ser definidos de tal forma que não causem variação significativa na proporção de mistura das argamassas. Considerando a proporção de mistura adotada neste trabalho, a densidade de massa fresca média de argamassas com RCC e amplitude máxima de variação do consumo de cimento por m^3 de 10 kg/m^3 , tem-se que é permitida uma variação de $\pm 0,4$ na proporção de mistura das

argamassas. Assim, como foi adotada aqui a proporção 1:1:8 em massa seca, o teor de areia reciclada poderia variar de 7,6 a 8,4. Isto equivale a uma amplitude de variação da umidade de 14%. Aqui adotaremos uma amplitude máxima de 10%, ou seja, um valor médio $\pm 5\%$.

A distribuição granulométrica do agregado é controlada indiretamente pelo processo de reciclagem. Assim, uma definição de limites de variabilidade, seja com base no módulo de finura, dimensão máxima característica ou na curva granulométrica seria útil para avaliar variações no processo causadas por problemas nos equipamentos, como no britador, peneira vibratória, moinho ou no lavador.

A consistência é uma propriedade que também deve ser controlada. Mas, neste caso, o importante é que, para uma dada quantidade de água, a argamassa se mostre trabalhável. Assim, considera-se aceitável que a consistência da argamassa, medida na mesa de consistência da ABNT, esteja entre 280 e 330 mm.

A densidade fresca das argamassas também deve ser considerada no controle, por retornar informações importantes, como o teor de ar aprisionado e o consumo de cimento por m³. Considera-se aceitável uma variação de $\pm 100 \text{ kg/m}^3$ em relação à média, não se desejando densidades abaixo de 1700 kg/m^3 .

Assim, a Tabela 68 apresenta as propriedades que, inicialmente, deverão ser controladas, sendo que no decorrer da pesquisa esta tabela pode sofrer alterações.

Tabela 68: Propriedades a serem controladas e limites de variação.

Propriedades	Limites de variação
Teor de finos < 75 μm do agregado	< 5%
Teor de umidade do agregado	$\pm 5\%$
Absorção de água do agregado	A definir
Módulo de finura	A definir
Consistência	Entre 280 e 330 mm
Densidade de massa fresca	$\pm 100 \text{ kg/m}^3$ e $> 1700 \text{ kg/m}^3$
Resistência à compressão	$\pm 1,5 \text{ MPa}$ e $> 4 \text{ MPa}$
Resistência à tração na flexão	Entre 0,5 e 1,5 MPa

5.10 Ferramentas estatísticas de análise dos resultados

A análise dos resultados foi realizada utilizando-se as seguintes ferramentas estatísticas:

- ferramentas básicas: coeficiente de variação, desvio-padrão, média, máximo, mínimo, amplitude;
- controle estatístico do processo (CEP);
- Normas de controle de qualidade.

Foi calculado também, nas Fases 4 e 5, não somente o desvio-padrão total, mas o desvio-padrão dos ensaios e da produção através da Equação 21 e da Equação 22 (HELENE; TERZIAN, 1995).

$$S_e = \frac{\sum A}{1,128 \times n} \quad \text{Equação 21}$$

S_e = desvio-padrão do ensaio.

n = número de amostras.

$\sum A$ = somatório das amplitudes de variação dos resultados de cada amostra.

$$S_p = \sqrt{S_t^2 - S_e^2} \quad \text{Equação 22}$$

S_p = desvio-padrão da produção.

S_t = desvio-padrão total.

S_e = desvio-padrão do ensaio.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Fase 1: Avaliação da variabilidade de areias recicladas, de argamassas e do desempenho de revestimentos produzidos pela reciclagem de RCC originais, não lavados e outros selecionados

6.1.1 Variabilidade das propriedades de areias recicladas não lavadas

A Tabela 69 e a Figura 54 apresentam um resumo das propriedades físicas das composições de areias recicladas de RCC selecionados. Os resultados indicam que as propriedades dos agregados com maiores variações foram a absorção de água e o teor de finos < 75 µm. As características físicas dos 3 agregados (cerâmica, argamassa e concreto) usados na formação da composições T1 a T10 estão no Anexo B.

A variabilidade dos resultados de absorção mostra, principalmente, que existem variações no teor de material cerâmico na composição, conforme definido pelas composições apresentadas na Tabela 61, sendo que esta variabilidade seria bem menor caso as composições variassem apenas entre T3 e T7.

Quando o agregado reciclado não é pré-saturado, a principal influência da absorção nas propriedades das argamassas está na diminuição do índice de consistência devido à absorção da água de amassamento para o interior dos grãos, apesar desta propriedade influenciar também na relação a/c efetiva e, assim, na resistência mecânica. Quanto aos valores de absorção, não existe qualquer restrição no uso de agregados com absorção igual à máxima obtida neste trabalho, de 11,5%, para a produção de revestimentos de argamassa.

O teor de finos < 75 µm também deve ser controlado, uma vez que este material causa grande influência em diversas propriedades das argamassas, como trabalhabilidade, consumo de água, retenção de água e resistência mecânica, e também nas propriedades de desempenho dos revestimentos, como aderência e fissuração (SELMO; BUCHER, 1990 e MIRANDA, 2000).

As composições de areia reciclada entre T2 e T7 são as mais facilmente encontradas em campo e a variação no teor de finos < 75 µm entre 11,6% e 19,1% é

excessiva. Assim, é importante que sejam concentrados esforços para diminuir a variabilidade do teor de finos.

Quanto à variabilidade do módulo de finura, considera-se que apenas as composições T1, T9 e T10, que possuem 100% de RCC cerâmico, de argamassa e de concreto, respectivamente, apresentam valores bem discrepantes para esta propriedade.

Dos resultados da Tabela 69, pode-se afirmar que é importante adotar um processo que impeça ou diminua a produção de lotes de agregado reciclado com composições bem distintas para evitar a formação de agregados muito heterogêneos.

Tabela 69: Variabilidade das propriedades físicas das composições de areias recicladas.

Composição de areia reciclada	Propriedades teóricas calculadas			Módulo de finura
	Absorção de água* (%)	Teor de finos < 75 µm (%)	Densidade de massa específica (kg/m ³)	
T1	11,5	22,8	2711	2,12
T2	9,9	19,1	2.692	2,24
T3	9,3	17,6	2684	2,29
T4	8,7	16,1	2677	2,34
T5	8,1	14,6	2669	2,39
T6	7,5	13,1	2661	2,45
T7	6,9	11,6	2654	2,50
T8	5,3	7,8	2634	2,62
T9	5,0	11,5	2625	2,06
T10	5,5	5,8	2639	2,92
* Resultados de absorção sem a fração passante na peneira de 0,15 mm.				
Máximo	11,5	22,8	2711	2,92
Mínimo	5,0	5,8	2624	2,06
Amplitude	6,5	17,0	87	0,87
Média	7,8	14,0	2664	2,39
DP total	2,2	5,2	28	0,25
CV total (%)	28	37	1,0	11

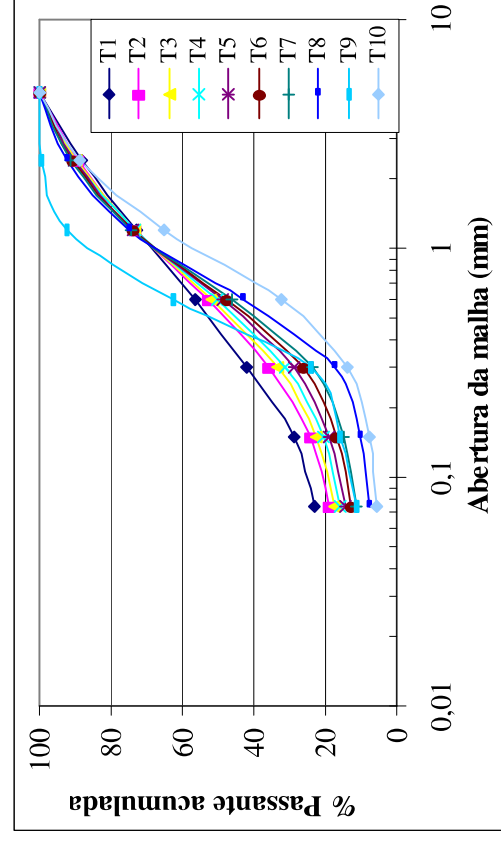


Figura 54: Curvas granulométricas das 10 composições de areias recicladas de RCC selecionados obtidos em Socorro/SP.

A Tabela 70 abaixo resume os resultados obtidos de caracterização das amostras não lavadas de areia recicladas, obtidas em Socorro/SP, e a Figura 55 apresenta a distribuição granulométrica das amostras S1 NL a S15 NL, todas peneiradas na tela de 2,4 mm, comparativamente a algumas das distribuições granulométricas das composições selecionadas.

Tabela 70: Resultados de variabilidade das propriedades físicas das amostras de areias recicladas não lavadas de Socorro/SP (S1 NL a S25 NL), para um total de 20 amostras. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C1.

	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Densidade de massa específica (kg/m ³)	Absorção de água ² (%)	Teor de finos < 75 µm (%) ¹	Módulo de finura ¹	Teor de sulfatos (%)
Mínimo	1051	2552	4,1	14,5	1,5	0,06
Máximo	1307	2700	9,1	29,2	2,2	0,16
Amplitude	257	148	5,1	14,7	0,7	0,10
Média	1184	2647	7,0	21,2	1,9	0,11
DP total	73	32	1,6	3,8	0,2	0,03
CV total (%)	6,2	1,2	23	18	10	29

¹ Para um total de 15 amostras peneiradas na peneira 2,4 mm (S1 NL a S15 NL).

² Resultados de absorção sem a fração passante na peneira de 0,15 mm.

Pelos resultados da Tabela 70 observa-se que agora a propriedade de maior coeficiente de variação é o teor de sulfatos, seguido novamente do teor de finos < 75 µm e da absorção de água.

Em relação à variação dos teores de sulfatos encontrados, ela decorre do RCC coletado, com origem, por exemplo, em demolição de alvenaria cerâmica, restos de argamassa e de concreto podem apresentar diferentes teores de sulfatos pela própria diferença de teor de cimento no RCC ou ter a contaminação por gesso de revestimento.

Além disso, observa-se que os valores estão entre os limites definidos pelo IGS (Tabela 36) para um risco pequeno e médio de surgimento de patologias.

Já as variações do teor de finos < 75 µm e da absorção de água continuaram elevados. A obtenção de amostras com teores de finos acima de 23% mostra que pode estar presente no RCC outro tipo de material que gera um teor de finos maior que o cerâmico como, por exemplo, solo, ou que esta propriedade sofre influência do teor de finos presente no RCC antes de sua britagem.

As amostras S1 NL a S6 NL foram produzidas em campo sem qualquer intervenção deste pesquisador e, mesmo pelos resultados de granulometria a laser (Anexo D2), observa-se que o teor de finos < 75 µm é bem elevado, variando entre 20 e 22%.

De qualquer forma, este valor é muito elevado para que o material seja usado como argamassa, desrespeitando até mesmo o limite de 20% da NBR 15116/04, podendo causar falhas de desempenho como pulverulência superficial, alto consumo de cimento e fissuração excessiva.

O ensaio de absorção de água foi nesta fase realizado removendo-se as partículas < 0,15 mm para evitar coesão do material e influência nos resultados. Observa-se que não foram obtidos resultados de absorção tão altos quanto aqueles encontrados para as composições T1 e T2.

Ao contrário do que aconteceu com as composições selecionadas, não foi possível para as amostras não lavadas obter qualquer tipo de correlação entre as

propriedades de absorção de água, teor de finos e densidade de massa específica pela diversidade de naturezas de materiais que compõem as amostras.

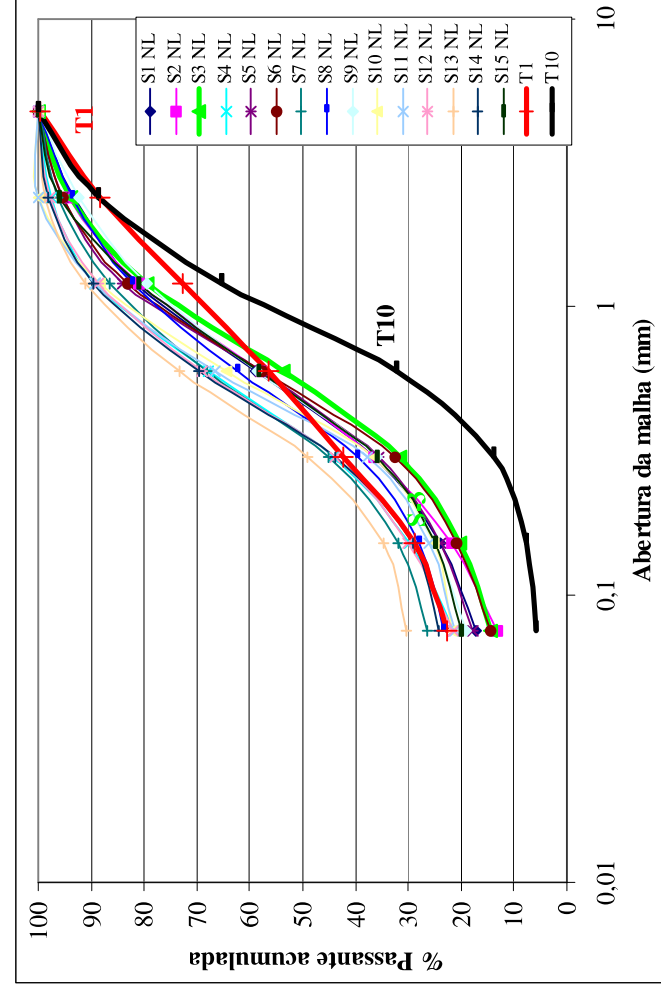


Figura 55: Distribuição granulométrica das amostras não lavadas de areias recicladas de Socorro/SP.

Como resumo deste item, pode-se afirmar que, com exceção da densidade de massa específica, as demais propriedades analisadas dos agregados sofreram uma variação significativa, tanto nas amostras não lavadas quanto nas selecionadas.

O teor de sulfatos deve ser controlado de forma a ser mantido sempre abaixo do valor máximo definido em norma em função do risco de surgimento de patologias. E a forma mais fácil de se conseguir isto é através do controle do RCC recebido na usina.

A densidade de massa aparente sofre influência tanto do teor de finos < 75 μm como da absorção do agregado, uma vez que ela está relacionada à porosidade. O módulo de finura também sofre influência do teor de finos do agregado.

Assim, considerou-se fundamental concentrar esforços no controle, principalmente, do teor de finos < 75 μm e da absorção do agregado, devido à

variabilidade e à influência dessas propriedades nas demais propriedades dos agregados e argamassas.

6.1.2 Variabilidade das argamassas no estado fresco com areias recicladas não lavadas

A Tabela 71 apresenta os resultados de caracterização no estado fresco das argamassas produzidas com as 10 composições de areias recicladas selecionadas.

Os resultados mostram que a relação água/materiais secos (H) e a relação água/cimento total diminuiram com a redução do teor de material cerâmico na composição, sendo que o menor valor foi para a T9 composta de 100% de RCC de argamassas. Isto porque, quando se diminui o teor de material cerâmico do RCC, obtém-se uma diminuição da absorção de água e do teor total de finos < 75 µm. Estas correlações podem ser vistas na Figura 56 e na Figura 57.

Tabela 71: Resumo dos resultados de caracterização no estado fresco das 10 composições de argamassa com areias recicladas selecionadas, na proporção 1:8 (cimento CP III 40 RS e areia reciclada selecionada).

Argamassas	H total (%)	Relação a/c total (kg/kg)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
T1	37,4	3,37	1790	145
T2	32,5	2,93	1834	154
T3	30,6	2,75	1841	157
T4	28,9	2,60	1831	158
T5	27,0	2,43	1824	160
T6	25,9	2,33	1853	164
T7	25,0	2,25	1846	164
T8	20,4	1,84	1740	161
T9	19,4	1,74	1781	166
T10	22,2	2,00	1836	167
Mínimo	19,4	1,74	1740	145
Máximo	37,4	3,37	1853	167
Amplitude	18,0	1,63	113	22
Média	26,9	2,42	1818	159
DP total	5,6	0,51	35,8	6,6
CV total (%)	20,9	20,9	2,0	4,1

Quanto à variabilidade, observa-se que, das propriedades analisadas e para uma consistência fixa em 275 ± 10 mm, a relação água/materiais secos (H total) e a relação água/cimento foram as que mais sofreram variação em função da composição.

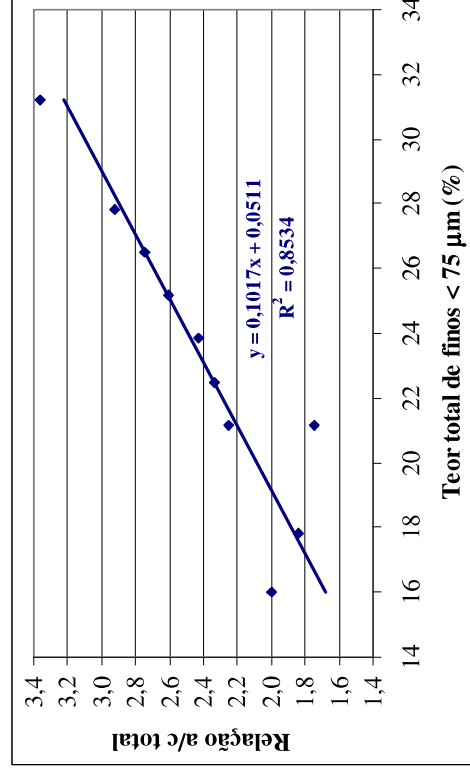


Figura 56: Correlação entre a relação água/cimento total e o teor total de finos < 75 μm dos agregados, para as 10 composições de argamassas com areias recicladas de RCC selecionados de Socorro/SP (T1 a T10, Fase I).

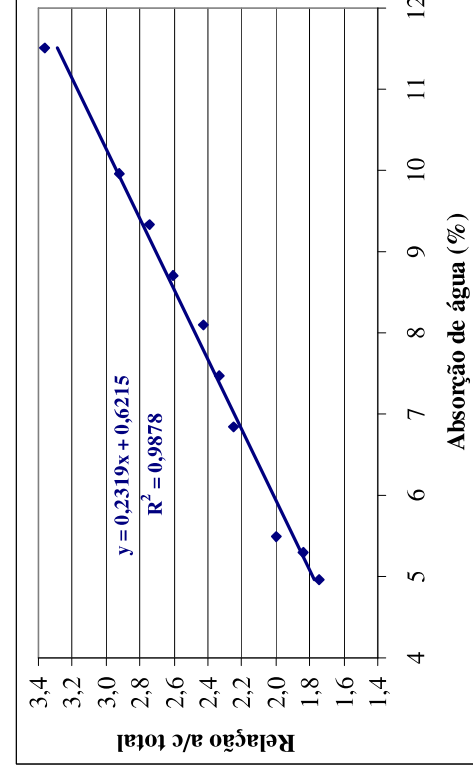


Figura 57: Correlação entre a relação água/cimento total das 10 composições de argamassas e a absorção de água das areias recicladas de RCC selecionados de Socorro/SP (T1 a T10, Fase I).

Ao contrário do que foi obtido para as argamassas de areias de RCC selecionados, as argamassas feitas com areias recicladas não lavadas e originais da usina não apresentaram um bom coeficiente de correlação entre a relação água/cimento e o teor total de finos < 75 µm (Figura 58) ou a absorção de água do agregado.

Isto ocorreu pela quantidade de variáveis agindo conjuntamente sobre as características das amostras coletadas em campo, sem qualquer tratamento além da simples britagem, ao invés das amostras preparadas em laboratório e com origem em um único conjunto de 3 materiais previamente selecionados. Nessas, a porosidade dos agregados e a natureza dos finos sofreram variações controladas a partir de uma única partida de materiais.

Apesar de não existirem normas que especifiquem limites máximos de variação de consumo de água, de cimento e de densidade de massa fresca de argamassas, considera-se que a variação dos resultados das amostras não lavadas (Tabela 72) está um pouco excessiva, podendo causar problemas em propriedades no estado endurecido e no desempenho dos revestimentos. Algumas dessas amostras foram testadas quanto ao desempenho em argamassas de revestimento e os resultados foram sofríveis, como consta adiante no item 6.1.4.

Tabela 72: Variabilidade das propriedades no estado fresco das argamassas feitas com 20 amostras de areia reciclada não lavada (S1 NL a S25 NL), obtidas em Socorro/SP, na proporção 1:8 (cimento CP III 40 RS e areia reciclada). Os resultados individuais das amostras estão no Anexo E1.

	H total (%)	Relação a/c total (kg/kg)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
Mínimo	23,9	2,16	1690	146
Máximo	30,9	2,78	1890	166
Amplitude	7,0	0,62	200	20
Média	26,7	2,40	1811	159
DP total	1,9	0,17	47	5
CV total (%)	7,1	7,1	2,6	2,9

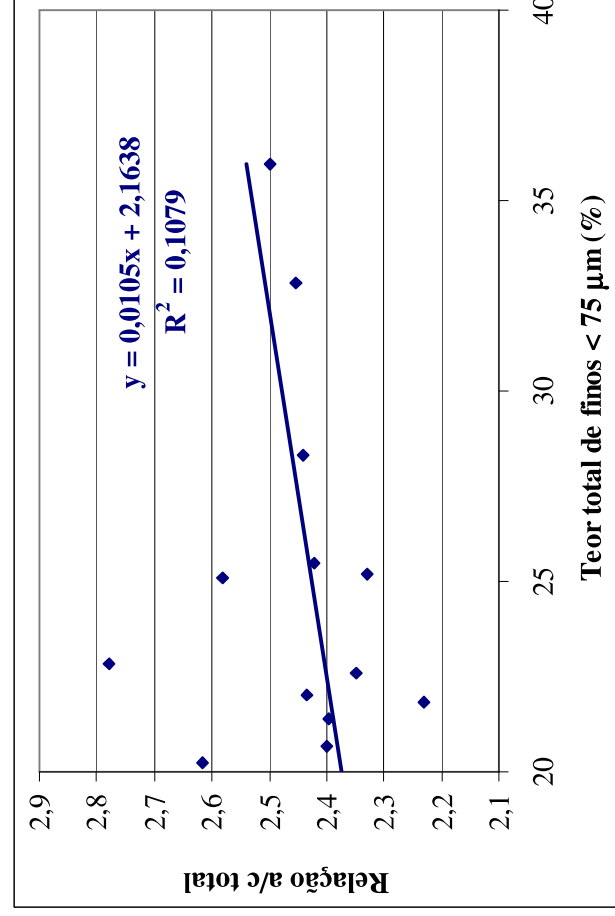


Figura 58: Baixa correlação entre a relação água/cimento total e o teor total de finos < 75 μm das argamassa feitas com 20 amostras não lavadas de areias recicladas de Socorro/SP.

Considerando que a proporção de mistura das argamassas era semelhante para todas as amostras não lavadas, a variação do consumo de cimento se deve, principalmente, às variações na densidade de massa no estado fresco da argamassa que, por sua vez, é afetada pela quantidade de água da mistura e pelas propriedades de absorção e porosidade dos agregados.

Assim, mais uma vez fica evidente a necessidade de se controlar as propriedades físicas dos agregados com variações excessivas, quais sejam a absorção de água e o teor de finos.

6.1.3 Variabilidade das argamassas no estado endurecido com areias recicladas não lavadas

6.1.3.1 Resistência mecânica

Os resultados da Tabela 73 mostram que as resistências mecânicas das composições de argamassas com areias recicladas de RCC selecionados variaram excessivamente. Entretanto, a Figura 59 mostra que esta variação é função da relação

água/cimento das argamassas, que decresce com a diminuição do teor de material cerâmico na mistura, já que este contribui com partículas mais finas e porosas para os agregados dele derivados.

Tabela 73: Resumo dos resultados de resistência mecânica das 10 composições de argamassa com areias recicladas de RCC selecionados (T1 a T10), na proporção 1:8 (cimento CP III 40 RS e RCC selecionados), aos 28 dias de idade. Os resultados individuais das composições estão no Anexo F1.

	Resistência média à tração na flexão (MPa)	Resistência média à compressão (MPa)
Mínimo	0,08	0,52
Máximo	1,72	6,95
Amplitude	1,64	6,44
Média	0,80	3,87
DP total	0,56	2,21
CV total (%)	70,6	57,3

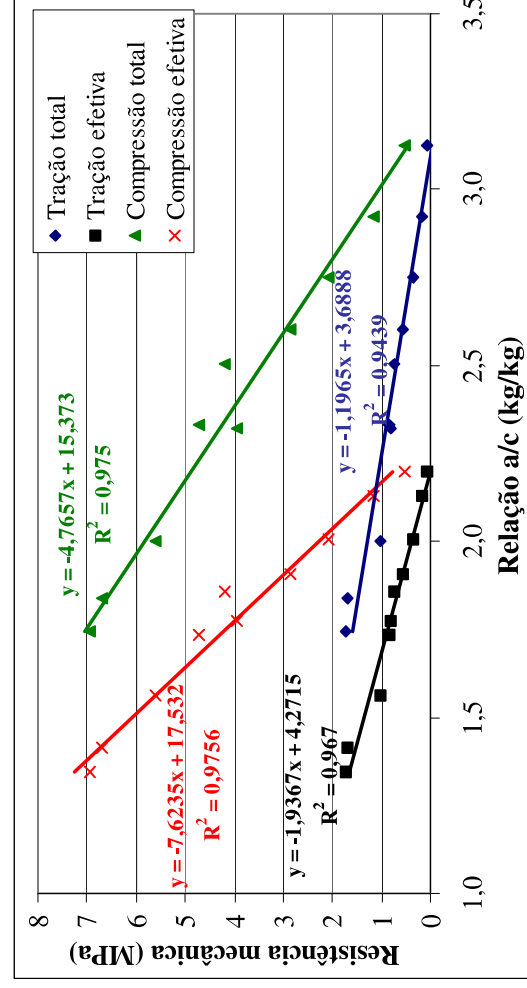


Figura 59: Correlação entre as resistências mecânicas (tração na flexão e compressão) e as relações a/c (totais e efetivas), aos 28 dias de idade, com as 10 argamassas de composições de RCC selecionados (T1 a T10), na proporção 1:8.

Entretanto, como visto na Figura 56 e na Figura 57, a relação a/c dessas 10 composições variou em função do teor total de finos < 75 µm das argamassas e da absorção dos agregados. Sendo assim, pode-se considerar que, indiretamente, para as

10 argamassas feitas com areias recicladas de RCC selecionados, a resistência mecânica é uma variável dependente dessas duas propriedades, se não houver outras variações expressivas na porosidade dos agregados reciclados (volume e forma dos poros).

Para as argamassas feitas com amostras de areias recicladas não lavadas (NL) originais da usina, a amplitude de variação da resistência à tração na flexão é aceitável, apesar de um alto coeficiente de variação e da baixa resistência obtida (Tabela 74). Entretanto, para a resistência à compressão, os resultados são insuficientes independente do parâmetro estatístico analisado, quando comparados com as classificações da prEN 998-1/93, apresentadas no item Tabela 50 e da NBR 13281/05, apresentadas na Tabela 52.

Tabela 74: Variabilidade das propriedades no estado endurecido das argamassas feitas com 20 amostras de areias recicladas não lavadas (S1 NL a S25 NL), na proporção 1:8 (cimento CP III 40 RS e areia reciclada). Os resultados individuais das amostras estão no Anexo F4.

	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
Mínimo	0,37	2,02
Máximo	1,13	6,53
Amplitude	0,76	4,52
Média	0,70	3,71
DP total	0,25	1,23
CV total (%)	35	33

Como mostrado na Figura 60, obteve-se uma baixa correlação entre a resistência à compressão e as relações a/c para as amostras não lavadas. O mesmo ocorre quando se procura uma correlação entre a resistência mecânica e o teor total de finos < 75 µm. De fato, é bem mais difícil obter bons coeficientes de correlação com as areias recicladas não lavadas originais da usina, onde não se tem controle nem das propriedades nem da natureza dos materiais que compõem os resíduos.

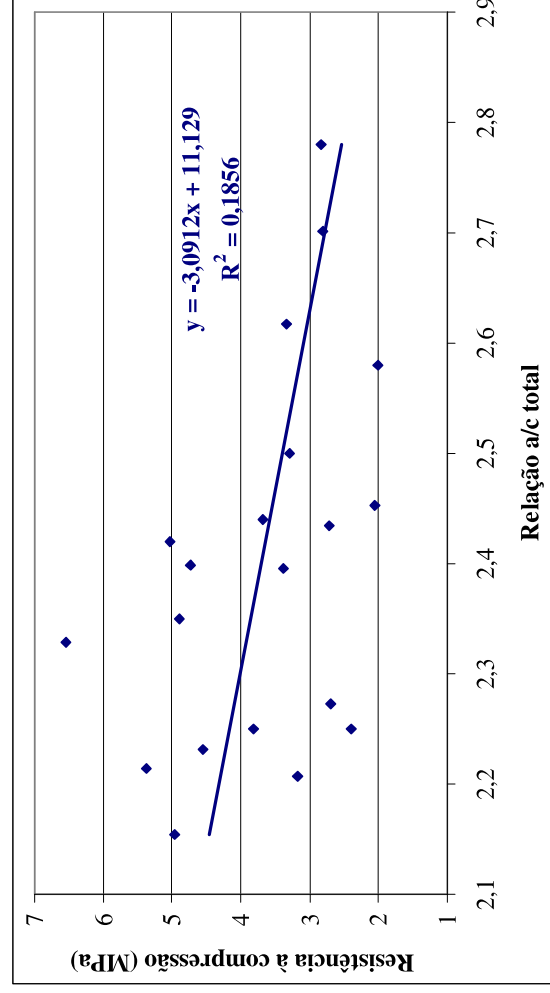


Figura 60: Relação entre a resistências à compressão e a relação a/c total, aos 28 dias de idade, para 20 argamassas de areias recicladas não lavadas, dosadas na proporção 1:8.

6.1.3.2 Retração por secagem

Os resultados de retração por secagem das 10 argamassas feitas com as areias recicladas de composições de RCC selecionados estão mostradas na Figura 61.

Infelizmente, não foi possível medir a retração total da argamassa T1, uma vez que os corpos-de-prova ficaram muito fracos e quebraram na desmoldagem.

Para as demais argamassas, pode-se afirmar que as argamassas T3 a T8 tiveram comportamentos bem semelhantes, com pequena amplitude de variação dos resultados.

Apenas as argamassas T2, T9 e T10 é que apresentaram resultados bem diferenciados, mostrando mais uma vez que a influência da natureza do RCC nas propriedades das argamassas ocorre, principalmente, para situações extremas de composição.

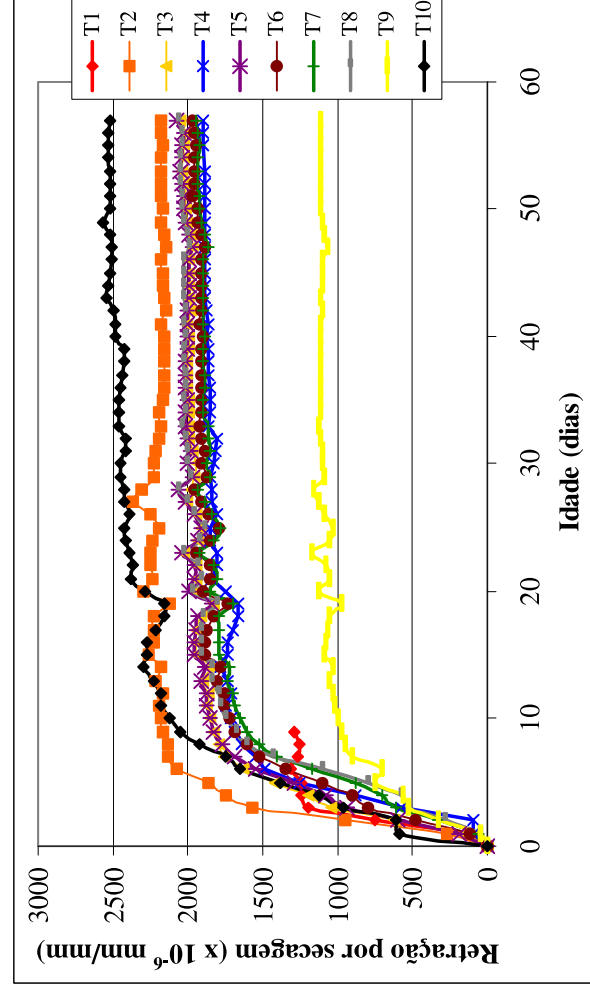


Figura 61: Retração por secagem das argamassas feitas com areias recicladas de RCC selecionados (1:8 em massa) segundo a NBR 8490/84, em função da idade. Barras mantidas em câmara úmida até 7 dias e após em câmara seca (U.R.= 55% \pm 10% e T = 25 $^{\circ}$ C \pm 5 $^{\circ}$ C).

A menor retração obtida para a argamassa T9 pode ser justificada pelo menor consumo de água, baixo teor de finos < 75 μ m e pela natureza desses finos (finos de cal ao invés de finos argilosos).

A maior retração da T2 em relação às composições T3 a T7 é justamente pelo maior teor de finos e de água presente nesta argamassa, já que a natureza dos finos é semelhante.

Quanto às argamassas produzidas com as amostras de areias recicladas não lavadas originais de Socorro/SP, obteve-se um elevado valor de retração para a maioria das argamassas e uma grande variabilidade dos resultados (Figura 62), quando comparado com os resultados obtidos com as amostras selecionadas.

De fato, a maioria das amostras não lavadas possuem um teor de finos < 75 μ m maior que nas composições de RCC selecionado. Entretanto, apenas isso não deve explicar os altos níveis de retração atingidos por estas argamassas, uma vez que o consumo de água delas foi, em sua maioria, menor.

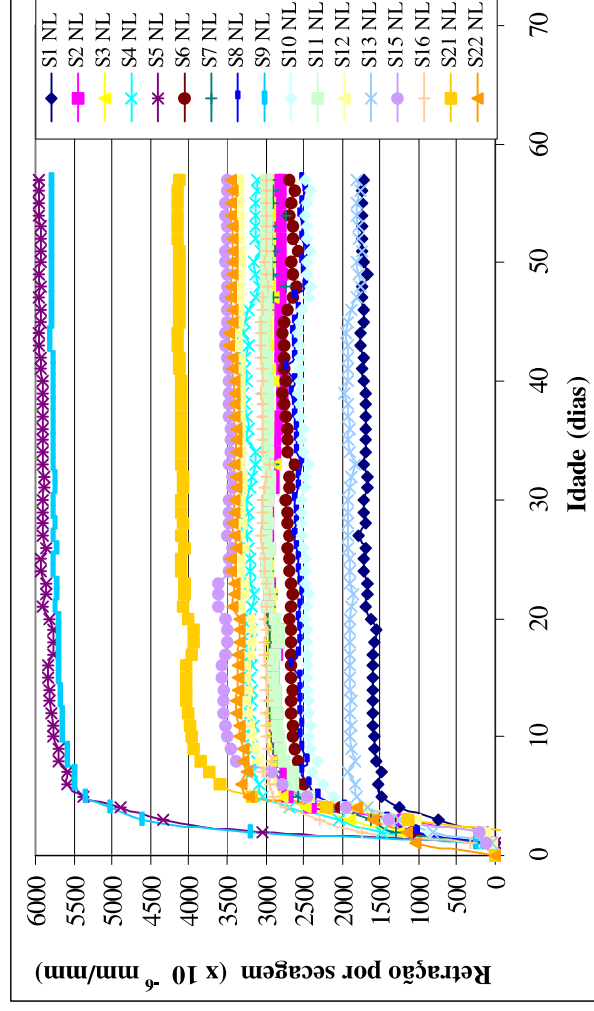


Figura 62: Retração por secagem das argamassas feitas com areias recicladas não lavadas originais de Socorro/SP (1:8 em massa) segundo a NBR 8490/84 em função da idade. Barras mantidas em câmara úmida até 7 dias e após em câmara seca (U.R.= $55\% \pm 10\%$ e $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Considera-se que as amostras não lavadas estão mais suscetíveis a grandes retrações pela natureza de seus finos, formada principalmente por solo e materiais argilosos, sendo quase ausente a presença de finos de cal ou carbonatos pela dificuldade de se encontrar resíduos de argamassa nesta usina. A cal presente em RCC de argamassa pode causar menor retração do que plastificantes de finos argilosos. Isto foi evidenciado no trabalho de SELMO; BUCHER (1990) (item 3.6.4.1) e pode ser observado aqui pela baixa retração obtida na composição T9 e na argamassa mista de cimento, cal e areia utilizada em MIRANDA (2000).

6.1.3.3 Absorção capilar

Os resultados de absorção capilar da Figura 63 indicam que a absorção das argamassas produzidas com as 10 composições de RCC tende a diminuir à medida que se reduz o teor de material cerâmico da composição. Isto é justificado pela alta porosidade e elevado teor de finos desses materiais, bem como pela maior relação

água/cimento de suas argamassas, o que contribui para o aumento do volume de poros capilares.

Não foi possível medir a absorção de água da argamassa T1, pois os corpos-de-prova desmancharam durante o ensaio.

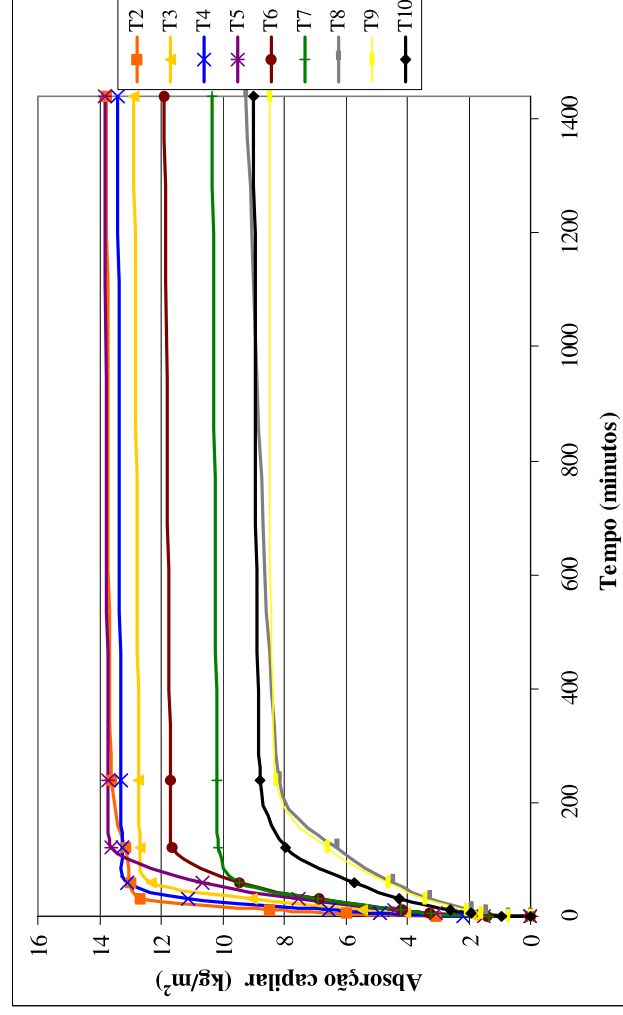


Figura 63: Absorção capilar das argamassas feitas com areias recicladas de RCC selecionados, na proporção 1:8 em massa, na metade dos corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm.

A Figura 64 mostra a ótima correlação obtida entre a absorção capilar de água dos corpos-de-prova de argamassa e a absorção de água dos agregados constituintes dos agregados, pois essa reflete a sua capacidade de absorção. Também foi possível obter boas correlações entre a absorção capilar e o teor de finos < 75 µm ou a relação a/c (total ou efetiva).

Para as argamassas produzidas com as amostras de areias recicladas não lavadas (Figura 65), observa-se que os valores finais de absorção capilar são bem maiores que os obtidos para as argamassas feitas com as composições de RCC selecionados, indicando a presença de uma quantidade significativa de materiais porosos na composição das amostras originais, possivelmente de solo.

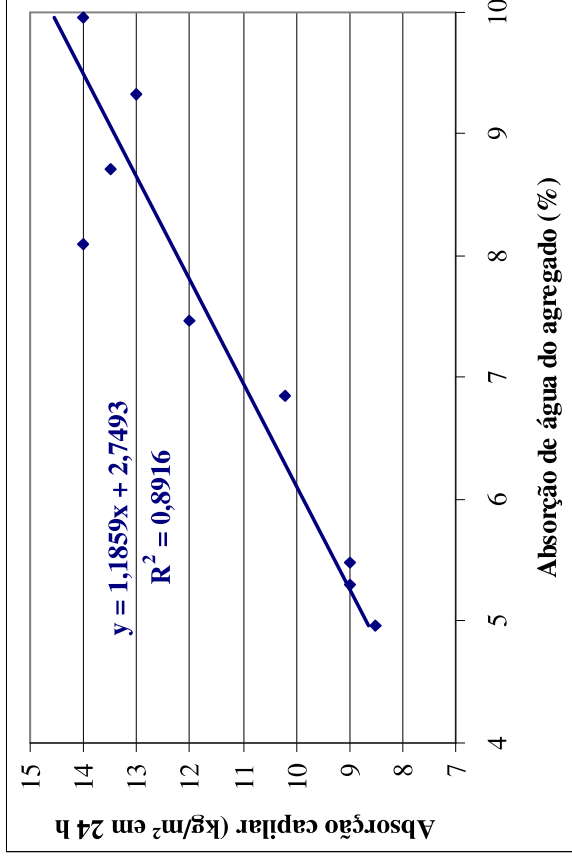


Figura 64: Relação entre a absorção capilar de água das argamassas com areias recicladas de RCC selecionados e a absorção de água teórica destes agregados.

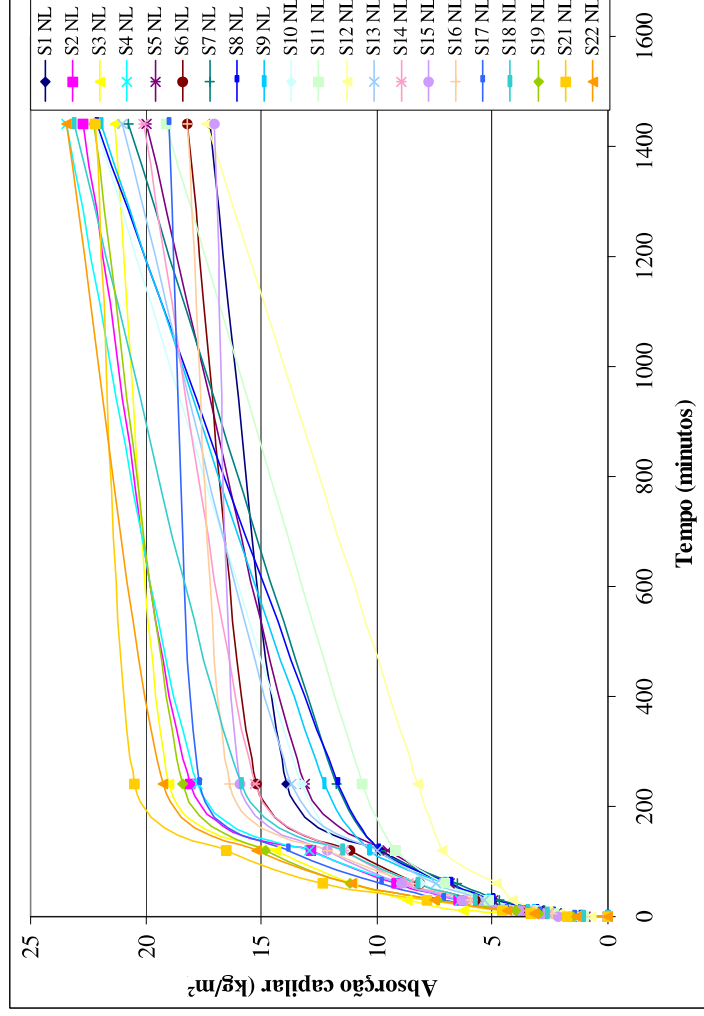


Figura 65: Absorção capilar das argamassas com areias recicladas não lavadas originais de Socorro/SP, na metade dos corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm.

6.1.4 Avaliação de desempenho dos revestimentos produzidos em Socorro/SP com areias recicladas não lavadas

A Tabela 75 apresenta um resumo dos resultados de desempenho dos revestimentos de argamassa feitos com cimento CP III 40 RS e areias recicladas não lavadas, originais da usina de Socorro/SP.

Conforme mostrado na Tabela 75, foram feitos testes de controle de dimensão máxima das areias e de condições de preparo das argamassas para verificação do desempenho final dos revestimentos.

Como características principais, pode-se afirmar que os revestimentos produzidos com essas areias tiveram um mau desempenho quanto às propriedades de aderência à tração e ocorrência de fissuras.

Em relação à fissuração, as principais razões deste elevado índice de fissuração são o elevado teor de finos $< 75 \mu\text{m}$ e a elevada relação a/c das argamassas. Nem mesmo com um peneiramento a seco das areias recicladas para remoção parcial da fração $< 0,15 \text{ mm}$ foi o suficiente para controlar a fissuração dos revestimentos.

Entretanto, a ocorrência das fissuras foi de forma diferenciada em função da natureza do substrato. Sobre alvenaria de tijolos cerâmicos maciços a ocorrência de fissuras visíveis nos revestimentos foi bem superior do que sobre blocos de concreto, onde predominou o surgimento de microfissuras somente visíveis com o revestimento molhado (Figura 66). Isso mostra a influência da absorção do substrato na fissuração de revestimentos.

Os baixos resultados de aderência à tração ao substrato de tijolos cerâmicos maciços, foram causados, principalmente, pelas suas condições de absorção excessiva e pela ausência de argamassa de assentamento nas juntas, causando uma diminuição significativa da área de aderência. Nem mesmo uma argamassa industrializada utilizada como referência nesta fase da pesquisa foi capaz de atingir, sobre este substrato, o valor mínimo de $0,20 \text{ MPa}$ definido pela NBR 13528/95.



(a)



(b)

Figura 66: Revestimentos feitos com areia reciclada não lavada na usina de Socorro/SP, em substrato de tijolo cerâmico maciço (a) e de bloco de concreto (b).

Tabela 75: Resultados da execução de revestimentos de argamassa com areias recicladas não lavadas originais de Socorro/SP.

Amostra	Substrato	Proporção de mistura	Peneiramento da areia (mm)	Mistura	Espessura (mm)	H total (%)	Abatimento (mm) ⁶	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Fissuração (cm/m ²)	Aderência média (MPa)
S7 NL	BC ¹	7,15	-	Enxada	10	31,8	55	-	24	0,20
S7 NL	BC	7,15	2,8 e 0,15	Enxada	10	31,8	65	-	0	-
S8 NL	TCS ¹	7,33	-	Enxada	20	32,8	57	-	876	-
S8 NL	TCS	7,33	2,4 e 0,15	Enxada	20	32,8	80	-	893	-
S9 NL	TCU ¹	7,52	2,4 e 0,15	Enxada	20	31,3	60	1834	852	0,09
S9 NL	TCU	7,52	2,4 e 0,15	Enxada	15	31,3	75	1811	649	0,01
S10 NL	TCU	5,56	2,4 e 0,15	Bet ² . 2,5'	15	29,5	-	1850	-	0,18
S12 NL	TCU	5,80	2,4 e 0,15	Bet. 2,5'	15	27,0	90	1695	768	0,10
S12 NL Cal	TCU	7,74	2,4 e 0,15	Bet. 2,5'	15	27,2	75	1873	1233	-
S14 NL	TCU	7,15	-	Bet. 2,5'	15	34,7	-	1829	TF	0,11
S19 NL	BC	7,04	2,4 e 0,15	Bet. 5'	20	32,2	40	1820	TMF	-
AI ⁴	TCU	-	2,4 e 0,15	Bet. 2,5'	15	16,0	-	1804	0	0,11
AI	TCU	-	2,4 e 0,15	Enxada	15	16,0	-	1827	0	-

Obs: 1) BC = bloco de concreto sem chapisco; TCS = tijolo cerâmico maciço seco, sem chapisco; TCU = tijolo cerâmico maciço úmido, sem chapisco.

2) Bet. 2,5' = misturada em betoneira no tempo de 2,5 minutos.

3) TF = todo fissurado; TMF = todo microfissurado.

4) AI = argamassa industrializada ensacada, encontrada no mercado, usada como referência nesta fase.

5) Proporção de mistura em massa seca, indicando a razão entre a massa de areia reciclada e a massa de cimento.

6) Abatimento medido pelo tronco de cone.

6.1.5 Resumo dos resultados obtidos na Fase 1

O objetivo da Fase 1 desta pesquisa foi avaliar a variabilidade nas propriedades das areias recicladas, das argamassas e dos revestimentos feitos com agregados não lavados da usina de Socorro/SP, confirmando-se quais as variáveis mais influentes nas propriedades das argamassas e uma possível correlação entre elas e as propriedades dos agregados, de forma a se evoluir no conhecimento necessário para a definição de métodos de controle e propriedades críticas a serem controladas. Com as amostras selecionadas, o objetivo foi confirmar a influência da variação da composição de RCC nas propriedades das argamassas, já que o trabalho de MIRANDA (2000) foi feito para areias recicladas produzidas apenas em laboratório e com resíduos íntegros, sem qualquer contaminante.

A caracterização dos agregados, das argamassas no estado fresco e endurecido e dos revestimentos, com amostras não lavadas e selecionadas, mostrou que:

- as propriedades das areias recicladas não lavadas com maior variação foram o teor de finos < 75 µm e a absorção de água;
- a variação das propriedades das argamassas feitas com areias recicladas não lavadas de RCC selecionados poderia ser considerada aceitável caso o teor de material cerâmico variasse entre 25% e 65% (composições T3 a T7);
- as propriedades das argamassas no estado fresco feitas com essas areias de composições selecionadas variaram devido à influência da natureza dos RCC nas propriedades de absorção de água e teor de finos < 75 µm dos agregados;
- as propriedades de resistência mecânica das argamassas com agregados selecionados mostraram-se como uma variável dependente da relação a/c das argamassas. Esta, por sua vez, variou em função da absorção de água do agregado e do teor de finos < 75 µm;
- a retração por secagem das argamassas mostrou ser dependente do teor de finos, do consumo de água e da natureza dos finos;

- a absorção capilar dos corpos-de-prova feitos com agregado selecionado apresentou boa correlação com a absorção do agregado, o teor de finos < 75 µm e a relação a/c das argamassas;
- os revestimentos aplicados sobre tijolos cerâmicos maciços apresentaram péssimo desempenho quanto à fissuração, causado principalmente pelo alto teor de finos < 75 µm e pela relação água/cimento das argamassas, mas também foi influenciado pela sucção capilar do substrato.

Sendo assim, evidenciou-se por esta fase que seria fundamental intervir no processo de reciclagem, principalmente, para reduzir a variabilidade do teor e da natureza dos finos < 75 µm e da absorção dos agregados, pela influência que estas propriedades podem causar nas propriedades das argamassas e desempenho dos revestimentos.

6.2 Fase 2: Avaliação em laboratório da eficácia do controle da distribuição granulométrica de areias recicladas na diminuição da variabilidade das argamassas

Comparando-se os resultados da Tabela 71 e da Tabela 73 com os da Tabela 76, nota-se que o controle granulométrico das composições de areias recicladas selecionadas causou diminuição da variabilidade do consumo de água das argamassas, com uma queda do coeficiente de variação, do desvio-padrão e da amplitude. Entretanto, a redução de variabilidade obtida não foi satisfatória, quando comparado com o que foi estabelecido como objetivo inicial na Tabela 68

Quanto aos resultados de resistência à compressão, apesar de ter diminuído a amplitude, o desvio-padrão e o coeficiente de variação, estes parâmetros continuaram elevados, uma vez que se obteve amostras com resistência à compressão de 0,47 MPa e 5,33 MPa, inaceitável para uma produção controlada de agregados.

Mas essa grande variação foi causada principalmente pelas amostras T1g e T9g, formadas, respectivamente, por 100% de RCC cerâmico e de argamassa. Caso estas amostras não fossem consideradas no cálculo, os resultados mecânicos estariam

dentro de intervalos de variação toleráveis, apesar de serem mais baixos os valores encontrados.

Sendo assim, é possível que o controle granulométrico possa auxiliar na redução da variabilidade das argamassas e esta propriedade já é considerada no controle de qualidade de algumas fábricas de argamassas industrializadas, como mostrado no item 4.5. Mas, em se tratando de areias recicladas de RCC, seria necessário ainda adotar algum procedimento que evitasse a presença de amostras compostas somente de entulho cerâmico ou de concreto. Além disso, um procedimento para controlar a natureza dos finos < 75 µm deveria ser implementado, considerando os resultados da Fase 1.

Tabela 76: Variabilidade no estado fresco e endurecido das argamassas produzidas com areias recicladas selecionadas de Socorro/SP, com distribuição granulométrica conforme a norma DTU 26.1 (proporção 1:8). Ensaio de resistência mecânica aos 28 dias de idade.

Composição	H total (%)	Consistência (mm)	a/c total	Densidade de massa (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Tração na flexão (MPa)	Compressão (MPa)
T1g	37	283	3,37	-	-	0,04	0,47
T2g	33	282	2,99	1785	149	0,23	1,55
T3g	33	292	2,95	1761	147	0,31	2,12
T4g	32	283	2,88	1753	148	0,39	2,24
T5g	30	289	2,74	1738	148	0,37	2,14
T6g	30	271	2,72	1706	146	0,41	1,76
T7g	28	290	2,54	1728	150	0,41	2,59
T8g	26	289	2,32	1633	144	0,83	3,35
T9g	24	312	2,2	1710	153	1,44	5,33
T10g	27	290	2,41	1679	147	0,75	3,78
Mínimo	24,5	-	2,2	1632	144	0,04	0,47
Máximo	37,4	-	3,37	1784	152	1,44	5,33
Amplitude	12,9	-	1,16	152	8	1,40	4,86
Média	30,1	-	2,71	1721	147	0,52	2,53
DP total	3,93	-	0,35	46	2,4	0,40	1,35
CV total (%)	13	-	13	2,7	1,6	76	53

Também, no caso de se decidir utilizar esta técnica em usina, é necessário avaliar se a melhoria nos resultados valeria o trabalho e custo operacional extras para separar a areia em 6 frações granulométricas e depois homogeneizar estas frações em quantidades pré-definidas.

A Figura 67 abaixo mostra que, também quando se utilizou o controle granulométrico nas amostras selecionadas, foi possível obter boa correlação entre as resistências mecânicas e a relação a/c das composições de argamassa com RCC.

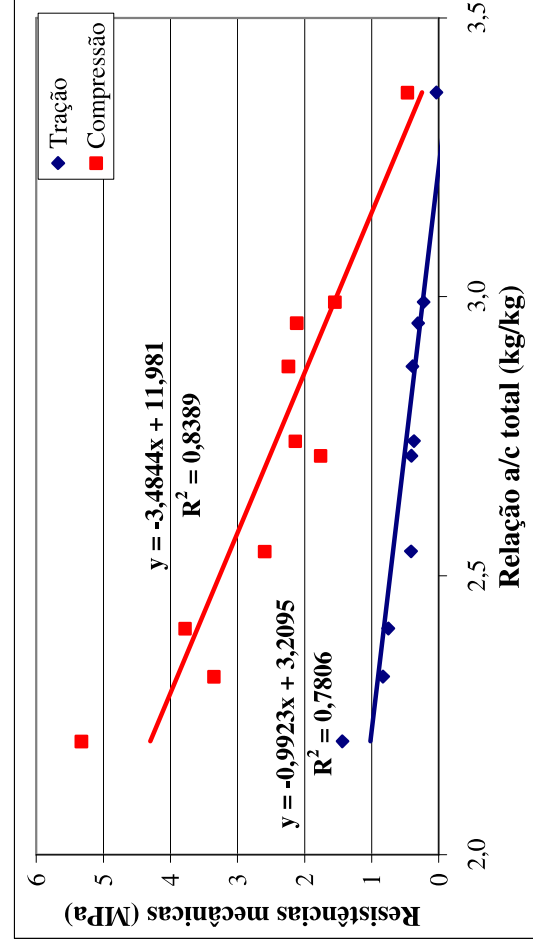


Figura 67: Correlação entre as resistências mecânicas e a relação a/c total para as argamassas produzidas com controle granulométrico pelo DTU 26.1/76 das composições de areias recicladas de RCC selecionados, com argamassas na proporção 1:8 (cimento, areia reciclada).

Os resultados obtidos para as argamassas feitas com a distribuição granulométrica da norma BS 5262/76¹ (Tabela 64) foram semelhantes aos resultados obtidos com a distribuição da norma DTU 26.1/78 e, por isto, não estão analisados.

6.3 Fase 3: Avaliação em laboratório da eficácia do controle da natureza e do teor de finos de areias recicladas, por lavagem em peneira de 0,15 mm, na diminuição da variabilidade das argamassas

6.3.1 Variabilidade das propriedades das areias recicladas lavadas em peneira de 0,15 mm, em laboratório

Na análise, em laboratório, da eficácia da lavagem de areias recicladas em peneira 0,15 mm, toda a fração de material maior que 1,2 mm e menor que 0,15 mm foi retirada das amostras. Com isso, os valores encontrados inicialmente das propriedades principais dos agregados foram alterados.

Primeiramente, foi anulada a variabilidade do teor de finos < 75 μm . Além disso, mudou-se a distribuição granulométrica (Figura 68) e a absorção de água das areias recicladas.

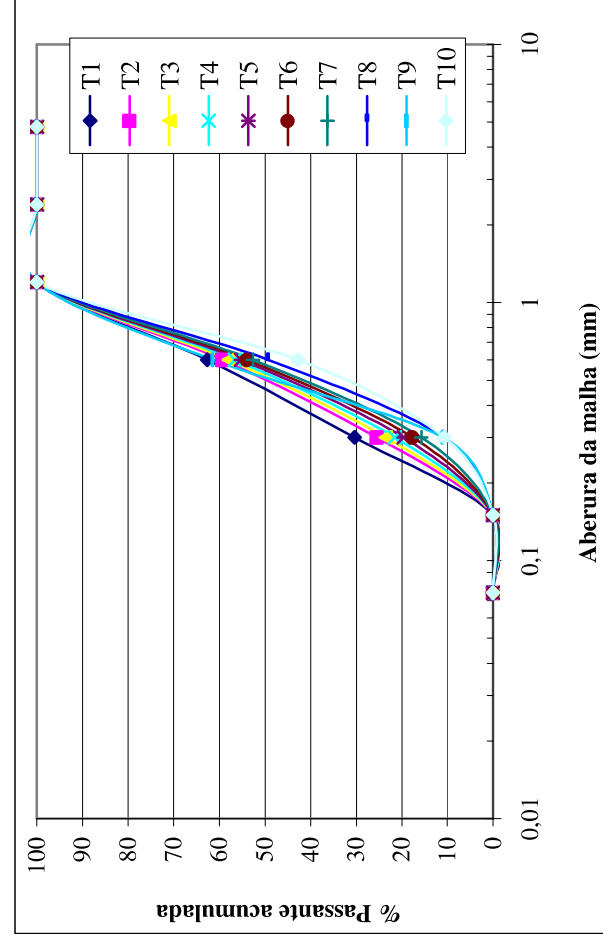


Figura 68: Distribuição granulométrica teórica das 10 composições de areias recicladas passantes na peneira de 1,2 mm e lavadas em laboratório na peneira de 0,15 mm.

Foram também lavadas 17 amostras de areias recicladas, sendo que apenas 6 foram caracterizadas quanto à absorção de água (Tabela 77). A peneira de corte

superior de 1,2 mm foi utilizada com o intuito de se obter um revestimento com acabamento mais liso.

Apesar do menor número de amostras ensaiadas, os resultados de variabilidade obtidos aqui foram semelhante àqueles obtidos na Fase 1, mas com o valor médio da absorção reduzido.

Quanto ao módulo de finura, a variação ainda resultou grande devido às diferentes formas de obtenção das amostras em campo, com substituição da abertura de peneira utilizada. Por isso, o resultado não precisa ser aqui considerado como importante.

Tabela 77: Variabilidade das propriedades físicas de 6 amostras de areias recicladas lavadas em laboratório. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C2.

	Absorção de água (%)	Módulo de finura
Mínimo	1,6	1,9
Máximo	6,6	3,0
Amplitude	5,1	1,1
Média	3,5	2,3
DP total	1,2	0,4
CV total (%)	35	17,2

6.3.2 Variabilidade das argamassas no estado fresco com as areias recicladas lavadas em peneira de 0,15 mm, em laboratório

No estado fresco, pode-se afirmar que não houve diferença de resultados quando se compara a relação água/materiais secos e a relação água/cimento das 10 composições de argamassas produzidas com as areias recicladas de RCC selecionados, com e sem lavagem. Ou seja, a substituição da fração < 0,15 mm das areias recicladas por cal não causou modificações significativas nessas propriedades das argamassas, servindo apenas para reduzir a amplitude de variação da densidade de massa fresca.

Aliás, como mostrado na Fase 1, o consumo de água das argamassas feitas com amostras de areias recicladas de RCC selecionados estava mais correlacionado com a absorção dos agregados do que com o teor de finos e apenas remover os finos não foi o suficiente para reduzir a variabilidade dos resultados de consumo de água.

Confirma-se assim a influência da natureza mineralógica dos RCC selecionados na porosidade e absorção de água das areias recicladas.

Tabela 78: Variabilidade das propriedades no estado fresco das 10 composições de argamassas produzidas com areias recicladas de RCC selecionados e lavados em laboratório (proporção 1:1:8, CP III 40 RS, cal CH III e areia reciclada lavada).

Argamassas	H total (%)	Relação a/c total (kg/kg)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
T1 LL	34,9	3,14	1773	135
T2 LL	32,4	2,91	1773	137
T3 LL	30,6	2,75	1796	141
T4 LL	28,5	2,56	1838	146
T5 LL	27,4	2,46	1805	145
T6 LL	25,3	2,28	1821	148
T7 LL	24,8	2,23	1818	149
T8 LL	20,9	1,88	1759	148
T9 LL	18,4	1,65	1748	150
T10 LL	23,9	2,15	1803	148
Mínimo	18,4	1,65	1748	135
Máximo	34,9	3,14	1838	150
Amplitude	16,6	1,49	89	15
Média	26,7	2,40	1793	145
DP total	5,1	0,46	29	5
CV total (%)	19	19	1,6	3,6

Entretanto, para as amostras de areias recicladas originalmente produzidas na usina de Socorro/SP e nesta fase lavadas em laboratório, houve uma pequena redução da amplitude e do desvio-padrão da relação água/materiais secos e da relação a/c total para as 20 argamassas produzidas, em relação aos materiais não lavados, bem como uma diminuição da relação água/materiais secos média. Com isto e mais a eliminação da variação dos finos, a amplitude de variação da densidade de massa fresca e do consumo de cimento reduziu pela metade, variando entre intervalos aceitáveis.

A diferença de comportamento dos resultados obtidos para as argamassas com areias lavadas e originais e as outras de RCC selecionados apenas comprova a importância da homogeneização dos resíduos no processo de reciclagem e de se

controlar as propriedades decorrentes da sua composição mineralógica e porosidade, quais sejam: teor de finos < 75 µm e absorção de água dos agregados. Para as argamassas com amostras de areias recicladas de RCC selecionados lavados, onde ambas as propriedades tinham grande amplitude de variação, eliminar apenas os finos não foi suficiente. Para as amostras de areias recicladas originais e não lavadas, onde as absorções de água não tinham grande variabilidade, bastou apenas controlar o teor e a natureza dos finos através da lavagem.

Tabela 79: Variabilidade das propriedades das argamassas no estado fresco feitas com 20 amostras de areias recicladas lavadas em laboratório, a partir de agregados originais da usina, na proporção 1: 1: 8 em massa seca (CP III 40 RS, cal CH III e areia reciclada lavada). Os resultados individuais das amostras estão no Anexo E2.

	H total (%)	Relação a/c total (kg/kg)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
Mínimo	22,59	2,26	1752	140
Máximo	26,85	2,69	1845	150
Amplitude	4,27	0,43	92,5	10
Média	24,43	2,44	1812	146
DP total	1,11	0,11	21	2,5
CV total (%)	4,55	4,55	1,2	1,7

Assim, para as propriedades no estado fresco das argamassas feitas com amostras S1 LL a S25 LL, a lavagem das amostras apresentou uma boa eficácia na redução da variabilidade das argamassas.

6.3.3 Variabilidade das argamassas no estado endurecido com as areias recicladas lavadas em peneira de 0,15 mm em, laboratório

6.3.3.1 Resistência mecânica

A lavagem de areias recicladas de RCC selecionados, e a adição de cal na mistura, trouxeram vantagens significativas, tanto na redução da variabilidade quanto no aumento de resistência mecânica das argamassas (Tabela 80 e Tabela 81), quando comparado com os resultados da Fase 1.

Tabela 80: Variabilidade das propriedades de resistência mecânica das argamassas feitas com as 10 composições de areias recicladas de RCC selecionados e lavados em laboratório, com cal, na proporção 1:1:8 em massa seca, aos 28 dias de idade. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo F2.

	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
Mínimo	0,84	4,55
Máximo	1,89	9,80
Amplitude	1,05	5,25
Média	1,18	6,55
DP total	0,29	1,48
CV total (%)	24,2	22,6

Na avaliação das argamassas de areias obtidas de RCC selecionados, onde se trabalha com variações extremas de composição mineralógica, a variabilidade dos resultados foi bem superior à das amostras lavadas coletadas em Socorro/SP. Isto indica que, na prática desta usina, os valores extremos de composição não são comuns de ocorrer. Entretanto, é interessante que sejam implantados meios de prevenir este tipo de ocorrência.

Os resultados apresentados na Tabela 81 se referem à média da resistência obtida para 3 moldagens de cada amostra de areia reciclada.

Tabela 81: Variabilidade das propriedades de resistência mecânica das argamassas feitas com 20 amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (S1 LL a S25 LL), com cal, na proporção 1:1:8 em massa seca, aos 28 dias de idade. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo F5.

	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
Mínimo	0,65	3,58
Máximo	1,25	5,30
Amplitude	0,60	1,72
Média	0,89	4,58
DP total	0,14	0,47
CV total (%)	16,0	10,2

A Figura 69 mostra que, para a maioria das areias recicladas, a resistência à compressão aumentou com a lavagem das areias recicladas e a adição de cal como material plastificante. De fato, isto deveria acontecer, uma vez que houve uma leve

redução do consumo de água, remoção de materiais finos nocivos à hidratação do cimento e, também, pelo efeito aglomerante da cal.

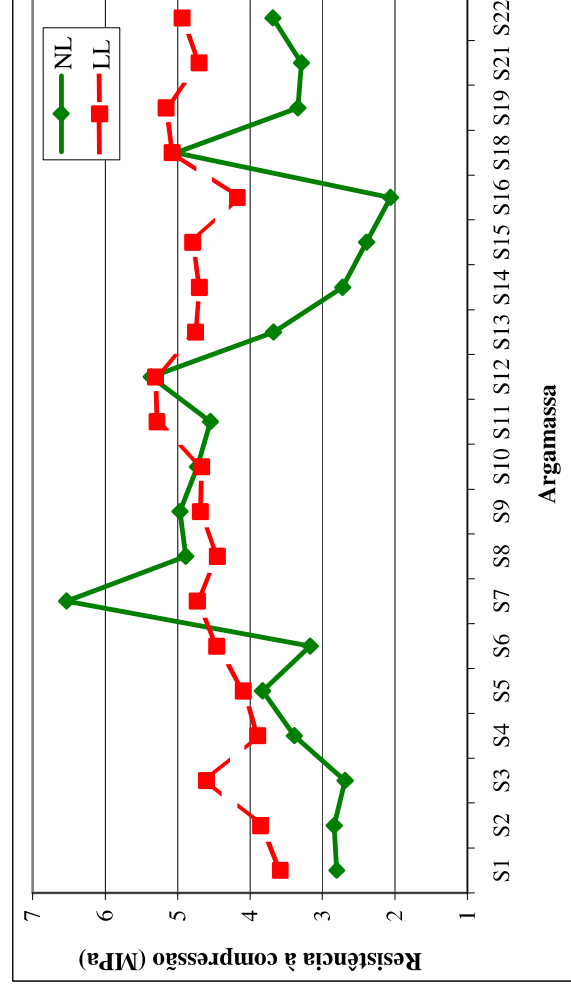


Figura 69: Resultados de caracterização das argamassas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório, na proporção 1: 1: 8.

A Figura 70 mostra que os resultados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão das argamassas produzidas com as amostras lavadas seguem uma distribuição aproximadamente normal, sendo possível aplicar, sem maiores problemas, os conceitos estatísticos de controle de processo.

Ao se calcular os limites de controle da resistência à compressão, utilizando-se as 20 amostras LL, obtém-se que a amostra S1, com 3,58 MPa de resistência, fica abaixo do limite inferior calculado. Por ter sido apenas esta amostra, este procedimento estatístico permite que ela seja eliminada do cálculo mesmo que não seja possível descobrir o motivo de sua baixa resistência, o que não é simples por ser desconhecida a composição dessas amostras.

Assim, a Figura 71 e a Figura 72 correspondem aos gráficos de controle da amplitude (“R control chart”) e da média (“X control chart”) para a resistência à compressão de 19 amostras.

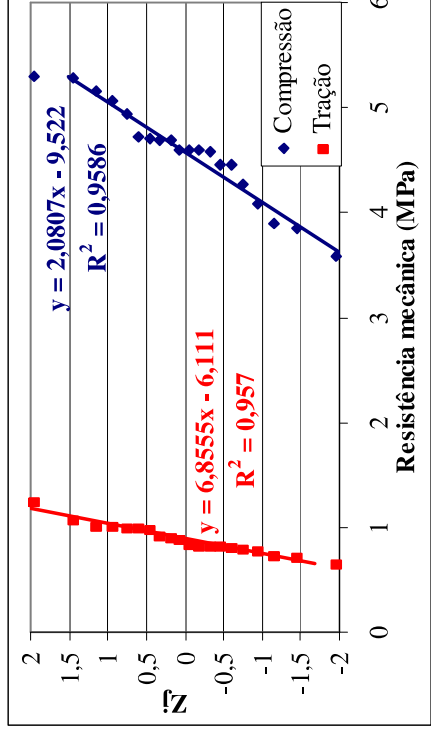


Figura 70: Distribuição aproximadamente normal dos resultados de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas feitas com as amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (S1 LL a S25 LL).

Na Figura 71, não existem pontos que excederam os limites de controle superior e inferior (UCL e LCL), nem qualquer outra configuração que indique que o processo está fora de controle.

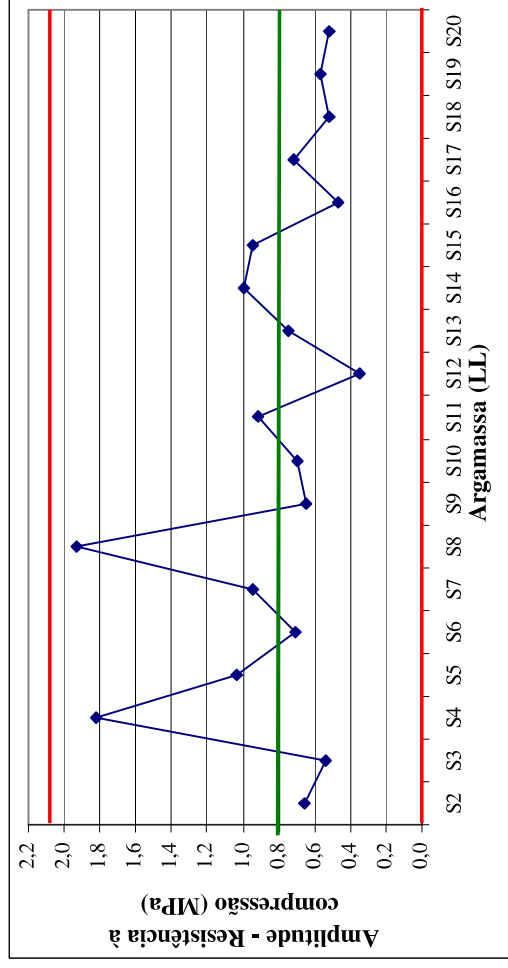


Figura 71: Gráfico de controle para amplitude da resistência à compressão de argamassas produzidas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (LL), na peneira de abertura de malha 0,15 mm.

Na Figura 72 também não se observa pontos fora dos limites superior e inferior. Entretanto, existem 4 pontos que estão bem próximas dos limites 3σ e 2 pontos consecutivos acima do limite de perigo 2σ . Isto é um indício de que o processo ainda está vulnerável e, no caso de uma lavagem dos agregados em campo, que pode deixar um residual de materiais finos, o processo pode sair fora de controle.

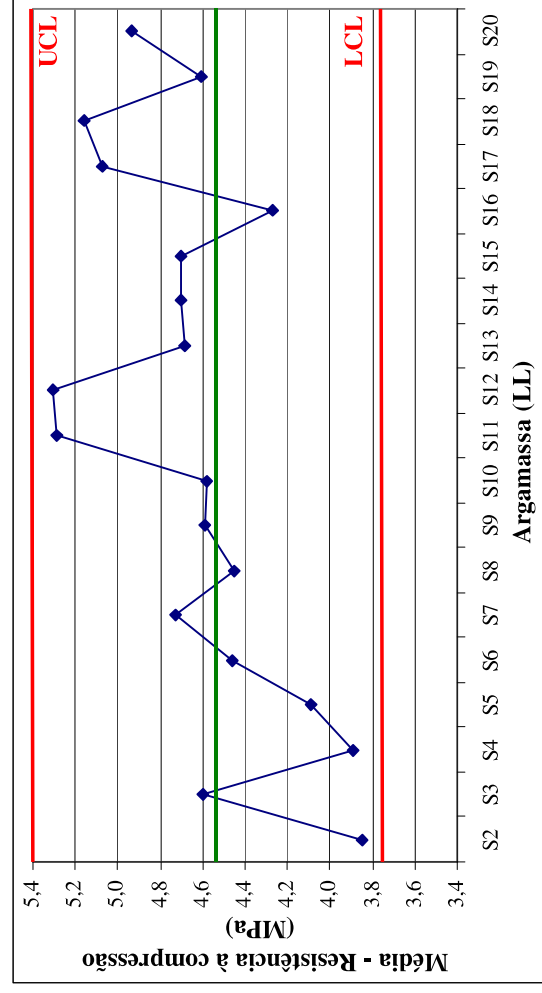


Figura 72: Gráfico de controle para a média da resistência à compressão das argamassas produzidas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (LL), na peneira de abertura de malha 0,15 mm.

Para a resistência à tração na flexão, o mesmo procedimento foi utilizado, porém eliminando-se a amostra 14 que apresentou uma resistência acima do limite superior do gráfico de controle da média.

Para a resistência à tração na flexão, não se observa qualquer configuração especial ou ponto fora dos limites de controle, seja para a amplitude (Figura 73) ou para a média (Figura 74). Ou seja, foi possível obter um processo sob controle para a resistência à tração na flexão.

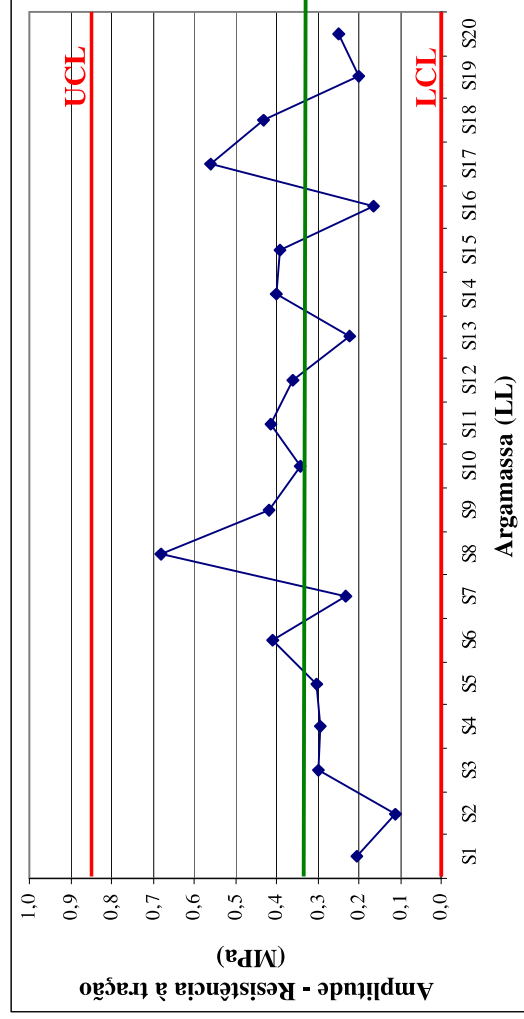


Figura 73: Gráfico de controle para a amplitude da resistência à tração na flexão das argamassas produzidas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (LL), na peneira de 0,15 mm.

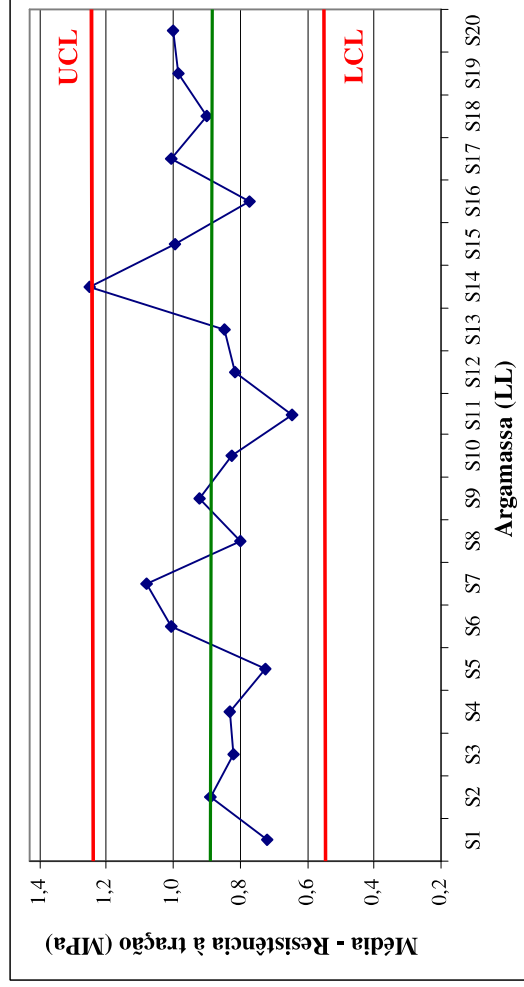


Figura 74: Gráfico de controle para a média da resistência à tração na flexão das argamassas produzidas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório (LL), na peneira de 0,15 mm.

A Tabela 82 apresenta um resumo dos dados estatísticos envolvidos na análise de controle de processo feitos para as duas propriedades mecânicas, bem como uma estimativa da capacidade do processo.

Apesar da resistência à compressão ter se mostrado mais vulnerável nos gráficos de controle, para os limites superior e inferior de especificação adotados, LSE e LIE, de ± 2 MPa em relação à média, o processo se mostrou capaz com $C_p = 1,36$, bem próximo ao valor mínimo de 1,33. Caso o intervalo de especificação fosse de $\pm 1,5$ MPa em relação à média, o processo não seria capaz.

Mas, para a resistência à tração na flexão, apesar dos gráficos de controle não terem apresentado qualquer irregularidade, o processo se mostrou incapaz para o intervalo de variação adotado de $\pm 0,5$ MPa em relação à média. Para esta propriedade, o processo só se mostraria capaz se o intervalo de variação fosse de, no mínimo, $\pm 0,78$ MPa. Considerando que as resistências atingidas para esta propriedade foram baixas, é mais conveniente adotar um processo que retorne menores desvios-padrão para a resistência à tração do que aumentar os limites de especificação.

Tabela 82: Estimativa da capacidade do processo para as duas propriedades mecânicas.

	Propriedades	
	Tração na flexão (MPa)	Compressão (MPa)
Média (X)	0,87	4,63
Amplitude (R)	0,33	0,83
Desvio-padrão (R/d2)	0,195	0,488
LIE	0,37	2,63
LSE	1,37	6,63
Número de sub-amostras	3	3
C_p	0,85	1,36
Valor mínimo C_p	1,33	1,33
% capacidade	117	73
Processo capaz	Não	Sim

6.3.3.2 Retração por secagem

Na Figura 75 estão os resultados de retração por secagem das 10 composições de argamassa, na proporção 1:1:8 (cimento: cal: areia reciclada lavada).

Pelos resultados, pode-se afirmar que a retração por secagem das argamassas T1 LL a T7 LL foram bem semelhantes, com diferenças significativas somente para as argamassas T8 LL (sem material cerâmico), T9 LL (somente argamassa moída) e T10 LL (somente concreto moído), ou seja, as de composição mineralógica extrema

Comparando-se agora estes resultados com aqueles obtidos para as 10 composições sem lavagem de RCC e sem uso de cal como adição plastificante (Fase 1), observa-se que não houve vantagem em controlar o teor de finos dessas argamassas com composições de RCC muito variadas, uma vez que nem o valor da retração final nem a amplitude de variação dos resultados sofreram redução. Isto também se explica pelo fato que para essas argamassas não houve redução da relação a/c mas também não existia a presença de solo nas areias recicladas, o que minimiza os efeitos de partículas finas.

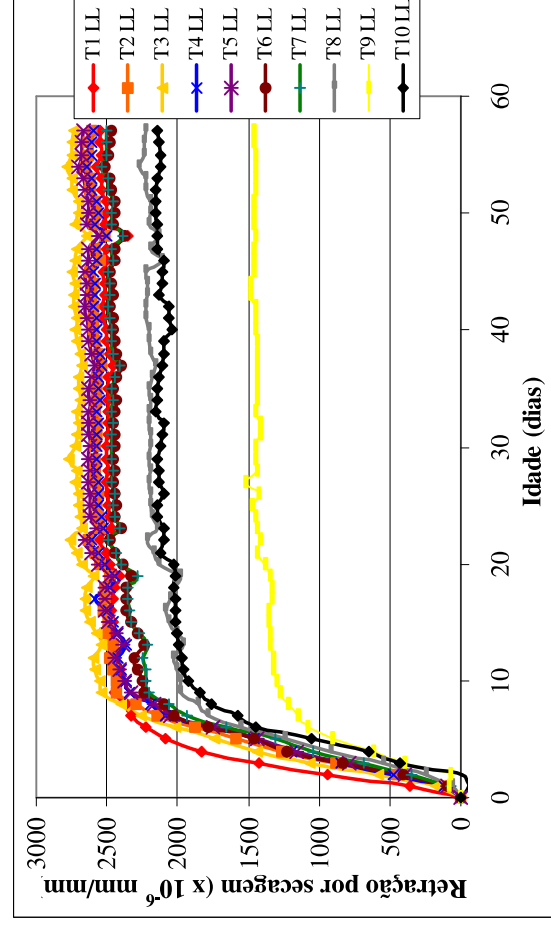


Figura 75: Retração por secagem das 10 argamassas feitas com areias recicladas de RCC selecionados e lavados em laboratório e com uso de cal (1: 1: 8 em massa) segundo a NBR 8490/84 em função da idade. Barras mantidas em câmara úmida até 7 dias e após em câmara seca (U.R.= 55% ± 10% e T = 25 °C ± 5 °C).

Entretanto, o mesmo não pode ser afirmado para as argamassas feitas com as amostras lavadas e do processo original de Socorro/SP. Os resultados apresentados na Figura 76, em comparação com os obtidos utilizando-se amostras não lavadas (Figura 62), indicam que o controle do teor de partículas finas por lavagem em peneira de 0,15 mm reduziu significativamente a retração total das argamassas e a amplitude de variação destes resultados, já que houve redução da relação a/c e eliminação de solo nas areias recicladas.

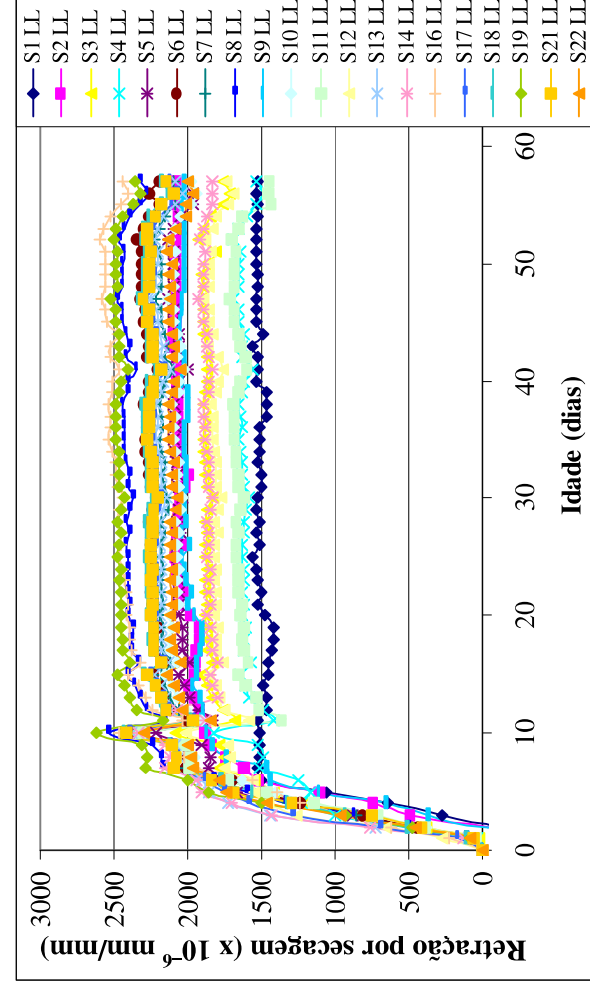


Figura 76: Retração por secagem das argamassas feitas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório e com uso de cal (1: 1: 8 em massa) segundo a NBR 8490/84, em função da idade. Barras mantidas em câmara úmida até 7 dias e após em câmara seca (U.R.= 55% \pm 10% e T = 25 $^{\circ}$ C \pm 5 $^{\circ}$ C).

6.3.3.3 Absorção capilar de água

É possível aqui dividir as argamassas em três grupos de absorção capilar: T1 e T2 (entre 14 e 16 kg/m²), T3 e T4 (entre 12 e 14 kg/m²) e T5 a T10 (entre 8 e 11 kg/m²).

Não foi observada redução significativa dos valores finais de absorção capilar ou de amplitude de variação dos resultados quando foram controlados o teor de partículas < 0,15 mm das argamassas feitas com as 10 composições de RCC

selecionados já que, como mostrado anteriormente, a absorção capilar está fortemente ligada à absorção do agregado e ao consumo de água das argamassas e estas propriedades sofreram pouca influência pela remoção dos finos, já que a variação da composição mineralógica e porosidade foi muito grande entre as amostras.

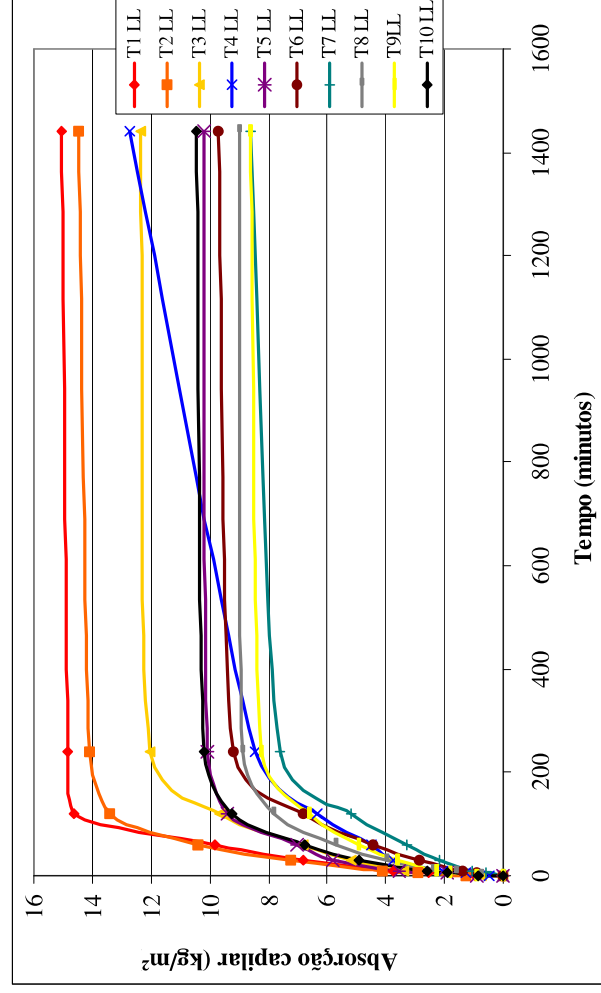


Figura 77: Absorção capilar das argamassas feitas com areia reciclada lavada em laboratório de RCC selecionado, na proporção 1:1:8 em massa (cimento, cal e areia lavada), na metade dos corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm.

Para as argamassas produzidas com as amostras de areias recicladas lavadas do processo original de Socorro/SP, o controle do teor dos finos das amostras reduziu significativamente a absorção capilar das argamassas. Isto porque, para estas amostras, o consumo de água das argamassas sofreu redução tanto de valor quanto de variabilidade, por provável consequência da remoção dos finos.

Em relação à amplitude de variação, somente 4 argamassas apresentaram absorções capilares de água discrepantes, estando as demais com uma amplitude de variação bem reduzida.

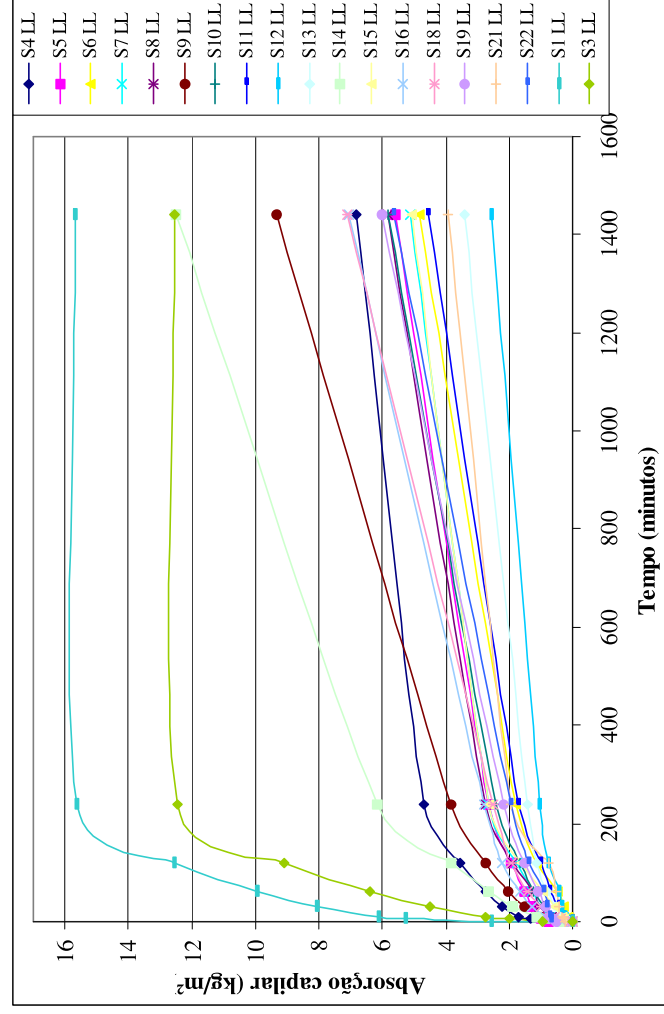


Figura 78: Absorção capilar das argamassas feitas com amostras de areias recicladas lavadas em laboratório, na proporção 1:1:8 em massa (cimento, cal e areia reciclada lavada), na metade dos corpos-de-prova de 4 x 4 x 16 cm.

Ou seja, tanto para a retração por secagem quanto para a absorção capilar, pode-se afirmar que o controle do teor de finos por lavagem em peneira de 0,15 mm e a utilização da cal como agente plastificante mostrou-se útil para reduzir a variabilidade dos resultados, quando comparado com as amostras não lavadas de Socorro/SP da Fase 1.

6.3.4 Avaliação de desempenho dos revestimentos produzidos em Socorro com areias recicladas lavadas em peneira de 0,15 mm e betoneira, em laboratório

A lavagem da areia reciclada em peneira de abertura de malha de 0,15 mm e a consequente remoção do excesso de finos < 75 μm melhorou muito o desempenho dos revestimentos no que diz respeito ao surgimento de fissuras.

Ao contrário do que ocorreu com os revestimentos produzidos com amostras não lavadas, poucos revestimentos feitos com material lavado apresentaram fissuras

e, mesmo nestes, as fissuras foram poucas e bem finas, não comprometendo a qualidade do acabamento e nem a aderência dos revestimentos.

Entre os revestimentos produzidos e na dosagem pré-estabelecida (1: 1: 10 em massa, cimento, cal e areia reciclada lavada e úmida), observou-se que os revestimentos que apresentaram maior tendência à fissuração foram aqueles onde a areia reciclada apresentou, após a lavagem, um teor de finos < 75 µm superior a 5%.

Considerando o teor de 5% de finos da areia reciclada lavada, o teor de finos total dessa argamassa (considerando a proporção aproximada, em massa, de 1: 1: 8, cimento, cal e areia) seria de 24%. Este valor está bem equiparado com a recomendação de MIRANDA (2000) que diz que, para evitar grandes riscos de fissuração em revestimentos, sem comprometer a trabalhabilidade da argamassa, esta não deve ultrapassar o teor total de finos < 75 µm de 25%.

Nas últimas amostras testadas, optou-se por peneirar o material na peneira 1,2 mm, como mostrado na Tabela 83, removendo-se o material de dimensão superior. Uma vez que estava sendo removido na lavagem quase todo o material inferior a 0,15 mm, a remoção da fração superior a 1,2 mm foi considerada necessária para permitir um revestimento com acabamento mais liso.



Figura 79: Revestimento feito com a amostra S21 LL e cal, na proporção 1:1:10 (cimento: cal: areia reciclada úmida), com acabamento liso, resistente e sem fissuras.

Mas, considera-se que, mesmo utilizando-se esta granulometria mais fina, o uso da cal foi indispensável no aumento da resistência superficial e na melhoria do

acabamento do revestimento. Os revestimentos feitos com material lavado e que tiveram somente o uso de aditivos, sem cal, não apresentaram um bom desempenho superficial.

Tabela 83: Resultados da execução de revestimentos de argamassa com areias recicladas lavadas em betoneira e em peneira de 0,15 mm, na usina de Socorro/SP.

Amostra	Substrato	Proporção de mistura	Aditivo/adição	Peneiramento (mm)	Mistura	Espessura (mm)	H total (%)	Abatimento em tronco de cone (mm)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Fissuração (cm/m ²)	Aderência (MPa)
S15 LL	TCU	6,24	-	-	Bet. 2,5'	15	32,5	70	1893	0	0,07
S15 LL	TCU	6,24	EA 0,1%	-	Bet. 2,5'	15	33,1	65	1855	0	0,18
S15 LL	TCU	6,24	H 0,15%	-	Bet. 2,5'	15	31,2	215	1546	0	0,12
S16 LL	TCU	7,15	Cal	-	Bet. 2,5'	15	29,0	75	2023	-	-
S19 LL	TCU	6,26	DW 0,5%	-	Bet. 5'	15	-	225	1560	0	0,11
S19 LL	BC	6,26	MOM 0,3%	-	Bet. 5'	15	-	230	1524	0	0,07
S20 LL	BC	-	HP + DW	2,4	Bet. 2,5'	15	-	150	1487	0	-
S20 LL	TCS	-	MOM 0,3%	2,4	Bet. 2,5'	15	-	160	1553	0	0,13
S21 LL	TCU	-	Cal	1,2	Bet. 2,5'	15	-	73	1524	-	-
S21 LL	BC	-	EA 1%,RB 1%	1,2	Bet. 2,5'	15	-	180	1524	11	0,03
S22 LL	BC	7,26	Cal + RB 0,5%	1,2	Bet. 4'	15	33,4	80	-	55	0,13
S22 LL	BC	7,26	Cal	1,2	Bet. 4'	15	37,3	80	1939	74	0,17
S22 LL	BC	7,79	Cal	1,2	Bet. 4'	15	34,2	160	1955	0	-
S22 LL	TCU	7,79	Cal	1,2	Bet. 4'	15	31,1	-	-	20	-
S22 LL	TCU	7,79	Cal	1,2	Bet. 4'	15	30,9	-	1953	93	-

TCU = tijolo cerâmico maciço úmido ; TCS = tijolo cerâmico maciço seco ; BC = bloco de concreto

6.3.5 Resumo dos resultados obtidos na Fase 3

O objetivo desta fase foi verificar a eficácia da remoção de partículas < 0,15 mm das areias recicladas, através de sua lavagem em laboratório, na redução da variabilidade das propriedades dos agregados e argamassas. Através dos ensaios analisados neste item 6.3, pode-se resumir que:

- foi possível obter um processo sob controle estatístico para as propriedades de resistência à tração na flexão e a compressão. Entretanto, o processo não se mostrou capaz para a resistência à tração com os limites de especificação sugeridos e, para a resistência à compressão, observa-se que o processo ainda é vulnerável;
- quanto aos revestimentos de argamassa, o grau de fissuração caiu muito com a substituição dos finos da areia por cal, chegando a se ter revestimentos sem fissuras mesmo em alvenaria de tijolos maciços. Os melhores resultados foram obtidos quando o teor de finos < 75 µm do agregado foi inferior a 5%;
- a substituição das partículas < 0,15 mm das amostras não lavadas por cal diminuiu o consumo de água das argamassas, aumentou a resistência mecânica e reduziu a absorção capilar e a retração por secagem. Para todas essas propriedades a variabilidade dos resultados também caiu significativamente.

Portanto, considera-se que a lavagem do agregado, por ter resultado em melhorias significativas no processo e ser de fácil aplicação em campo, deve ser incluída no processo de fabricação de argamassas com areia reciclada, mas em conjunto com uma outra técnica que aumente a estabilidade do processo, quanto à composição mineralógica das areias, de modo que não apresentem composições extremas, por resíduos classe A de densidade e porosidade muito diferentes.

6.4 Fase 4: Avaliação em campo da eficácia da classificação visual de RCC de natureza cerâmica ou mista, com e sem lavagem em peneira de 0,15 mm, na diminuição da variabilidade das argamassas

6.4.1 Variabilidade das areias recicladas obtidas através da classificação visual de RCC e lavagem em peneira vibratória

A Tabela 84 e a Tabela 85, respectivamente, apresentam um resumo dos resultados de caracterização obtidos para as amostras não lavadas da Fase 4, S26 NL a S45 NL, e lavadas em peneira vibratória, S26 LU a S45 LU.

A densidade de massa aparente das amostras não lavadas apresentou redução da amplitude de variação, em relação aos resultados obtidos na Fase 1. Esta redução indica que a classificação visual pode ter auxiliado na obtenção de amostras mais homogêneas, no que diz respeito à natureza de RCC.

Tabela 84: Variabilidade das amostras de areias recicladas não lavadas, S26 NL a S45 NL, obtidas na Fase 4 da pesquisa. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C1.

	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Densidade de massa específica* (kg/m ³)	Teor de finos < 75 µm (%)	Módulo de finura
Mínimo	1079	2590	13	1,5
Máximo	1283	2665	30	2,3
Amplitude	203	76	17	0,8
Média	1180	2644	20	1,9
DP total	60	29	4	0,2
CV total (%)	5,1	1,1	19	9,4
* Obtido para um total de 6 amostras apenas.				

Para as amostras lavadas, o controle visual da natureza de RCC em cinza e vermelho não foi suficiente para diminuir a variabilidade da absorção de água.

É importante observar que, caso as 20 amostras LU da Fase 4 tivessem sido misturadas em quantidades iguais, 5 a 5, na ordem em que elas chegaram na usina, seriam obtidos 4 resultados de absorção onde os valores mínimo e máximo teóricos dessa propriedade seriam 5,1% e 7,1%, ou seja, apenas 2% de amplitude.

Aliás, a mesma amplitude de variação de absorção da absorção seria obtida caso as amostras lavadas da Fase 3 (S1 LL a S25 LL) fossem misturadas, porém de 4 em 4, uma vez que o método de descarga destas amostras na usina já auxiliava em uma pré-homogeneização do RCC.

Assim, considerando que a absorção de água é uma propriedade que deve ser controlada, como já mostrado pelos resultados obtidos até aqui e no capítulo de revisão bibliográfica, torna-se necessário desenvolver e implementar um processo de reciclagem que atinja tal objetivo.

Tabela 85: Variabilidade das amostras de areias recicladas lavadas, S26 LU a S45 LU, obtidas na Fase 4 da pesquisa. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C2.

	Densidade de massa aparente seca (kg/m ³)	Densidade de massa aparente úmida (kg/m ³)	Densidade de massa específica (kg/m ³)	Absorção de água (%)	Teor de finos < 75 µm (%)	Módulo de finura
Mínimo	1079	1184	2597	4,0	1,6	1,7
Máximo	1193	1504	2702	9,9	7,3	2,2
Amplitude	114	319	106	5,9	5,7	0,5
Média	1123	1341	2647	6,1	4,5	1,9
DP total	31,1	74	30,7	1,9	1,9	0,1
DP do ensaio	5,3	-	29,9	0,4	0,4	-
DP da produção	30,7	-	7,0	1,8	1,8	-
CV total (%)	2,8	5,5	1,2	30	42	5,3
CV do ensaio (%)	0,5	-	1,1	6,7	7,9	-

Quanto ao módulo de finura, a variação aqui foi menor do que na Fase 3, pois apenas foi utilizada a peneira de 1,2 mm.

O processo de lavagem dos agregados em peneira vibratória com posterior imersão em um tanque não resultou em uma boa lavagem, com amostras chegando a um residual de 7,3% de finos < 75 µm. Isto se deve a variações a que este processo estava sujeito, como:

- variações na vazão de alimentação de água devido a problemas na bomba;

- entupimentos constantes nos furos dos canos utilizados como “chuveiro”;
- entupimento da tela de 0,15 mm, diminuindo a área aberta de lavagem da peneira;
- paradas no processo que causavam a decantação de granulometrias variadas no tanque de imersão.

A Figura 80 apresenta as distribuições granulométricas das amostras lavadas S26 LU a S45 LU, por peneiramento físico. A variação nas curvas granulométricas é causada principalmente por problemas na lavagem na fração inferior 0,15 mm. Isto mostra a importância de se obter um processo de lavagem em campo homogêneo e eficaz.

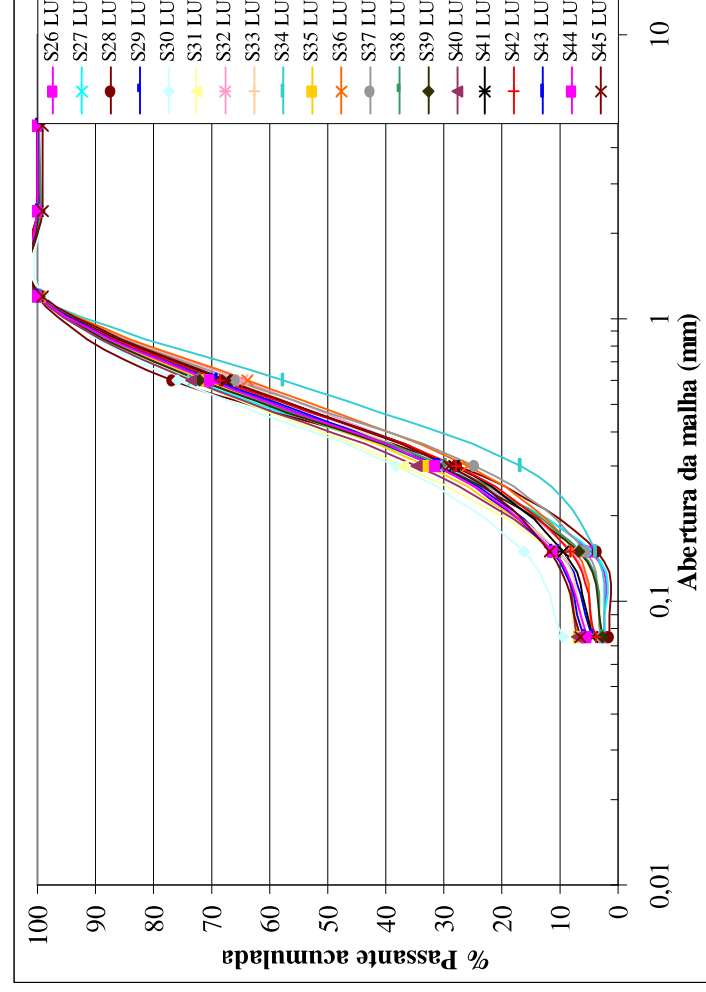


Figura 80: Distribuição granulométrica das amostras de areias recicladas lavadas da Fase 4, S26 LU a S45 LU.

Quanto à determinação do teor de finos < 75 µm, foi feita uma análise comparativa entre diferentes métodos de determinação: NBR 7219/87, laser com meios de dispersão álcool e água (Figura 81).

Os resultados indicam que, para as amostras LU, apenas aqueles obtidos pelo laser utilizando-se a água como meio de dispersão e o ensaio pela NBR 7219/87 é que foram semelhantes. Os resultados pelo laser sendo o meio de dispersão álcool apresentaram alguns pontos discrepantes, indicando um comportamento irregular do ensaio, que precisaria ser melhor investigado, pois pode se tratar de solubilização parcial com dispersão de novos tamanhos de partículas.

Já para as amostras NL, apesar das curvas terem um comportamento semelhante, os resultados pelo laser sendo o meio de dispersão a água foram, para quase todos os pontos, bem inferiores àqueles obtidos pelo método da NBR 7219/87.

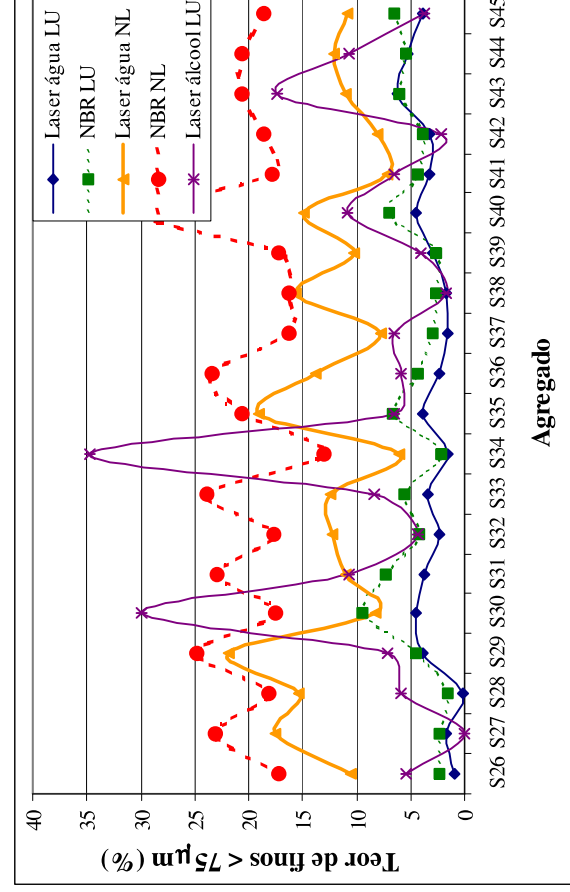


Figura 81: Resultados da Fase 4 dos teores de finos < 75 µm por diversos métodos de caracterização.

Inicialmente, poder-se-ia imaginar que as amostras NL ensaiadas conforme a NBR 7219/87, que possuíam alto teor de material cerâmico, teriam se desagregado durante o ensaio, aumentando o teor de finos. Entretanto, observando-se os resultados do laser, tem-se pelo menos 5 amostras com menos de 10% de finos < 75

µm, com resultados bem próximos aos obtidos para as amostras lavadas (LU), o que certamente é um equívoco fazendo-se uma simples análise visual comparativa entre estas amostras NL e LU.

Ou seja, nesta Fase 4, apenas os resultados obtidos com as amostras LU pelo método da NBR 7219/87 e pelo laser com a água como meio de dispersão é que foram compatíveis, ao contrário da experiência acumulada na dissertação de MIRANDA (2000), com resíduos de natureza controlada sem e sem contaminantes.

Nesta tese portanto, foram assumidos os resultados da NBR7219/87, pois se considera o método mais factível de adoção em controle de qualidade por usinas de reciclagem nacionais, ainda que precise ser aplicado com cautela para amostras de areias recicladas derivadas de materiais cerâmicos vermelhos ou outros passíveis de fragmentação por lavagem.

A maior variação dos resultados de densidade de massa aparente úmida, em relação à seca, que pode ser vista na Tabela 85, se deve à variação do teor de umidade dos agregados, que ficou entre 32 e 47% logo após a lavagem e entre 26 e 36% após 24 h. Conforme definido no item 5.9, considera-se aceitável uma amplitude de até 10%.

A grande variação do teor de umidade inicial ocorreu devido a duas razões:

- primeiro, pelas diferentes formas com que as amostras foram transportadas do local de sua obtenção até o local de ensaio, manualmente, em carrinho de mão ou na pá carregadeira, causando diferentes vibrações e permitindo a maior ou menor saída de água livre;
- segundo, pela própria diferença de absorção das amostras. Se a variabilidade da absorção de água for reduzida, ficará mais fácil controlar o teor de umidade dos agregados.

Entretanto, a permanência por 24 h do material em repouso e em local coberto permitiu a diminuição dessa amplitude para um intervalo aceitável, definido no item 5.9.

Os resultados de fluorescência de raios X, apresentados no Anexo C3, indicam uma coerência com a análise visual da composição do RCC utilizado para formação das amostras da Fase 4, uma vez que:

- os maiores teores de álcalis foram encontrados nas amostras com maior presença de solo (S32 LU, S33 LU e S36 LU);
- os maiores teores de MgO e CaO e as maiores perdas ao fogo foram encontrados nas amostras com maior presença de argamassa (S41 LU, S42 LU e S43 LU);
- o maior teor de SO₃ foi encontrado em uma amostra que possuía visível presença de gesso (S31 LU).

Considerando a importância da absorção de água do agregado nas propriedades das argamassas, o fato de estar sendo utilizado nesta pesquisa o tempo de imersão em água do agregado de 1 hora ao invés de 24h como manda a NBR 9777/87 e, ainda, o agregado ficar submerso apenas 10 minutos em água na argamassadeira, decidiu-se caracterizar a absorção de água dos agregados nesta fase em 3 tempos: 10 minutos, 30 minutos e 24 horas, como mostra a Figura 82. Os resultados individuais das amostras encontram-se no Anexo I.

Analisando a Figura 82, é possível fazer as seguintes afirmações:

- existe uma tendência de aumento da absorção do agregado de 10 minutos para 30 minutos. A diferença entre esses resultados variou entre 0,23% e 0,66% e, em média, a absorção aos 10 minutos significou 85% da absorção aos 30 minutos (variando de 75 a 93%);
- existe uma tendência de redução da absorção do agregado de 30 minutos para 24 horas, aproximando-se novamente da absorção com 10 minutos de imersão. A diferença entre os resultados variou entre 0,06% e 0,44% e, em média, a absorção em 24 horas significou 92% da absorção aos 30 minutos (variando de 82 a 97%). Esta redução pode ter ocorrido pelo fato de alguns grãos da areia reciclada (normalmente grãos cerâmicos ou torrões de argila) se desagregarem depois de imersos durante horas em água. Esta desagregação faz com

que as partículas maiores se dividam em partículas de materiais pulverulentos que aumentam a coesão da areia reciclada, diminuindo os resultados de absorção.

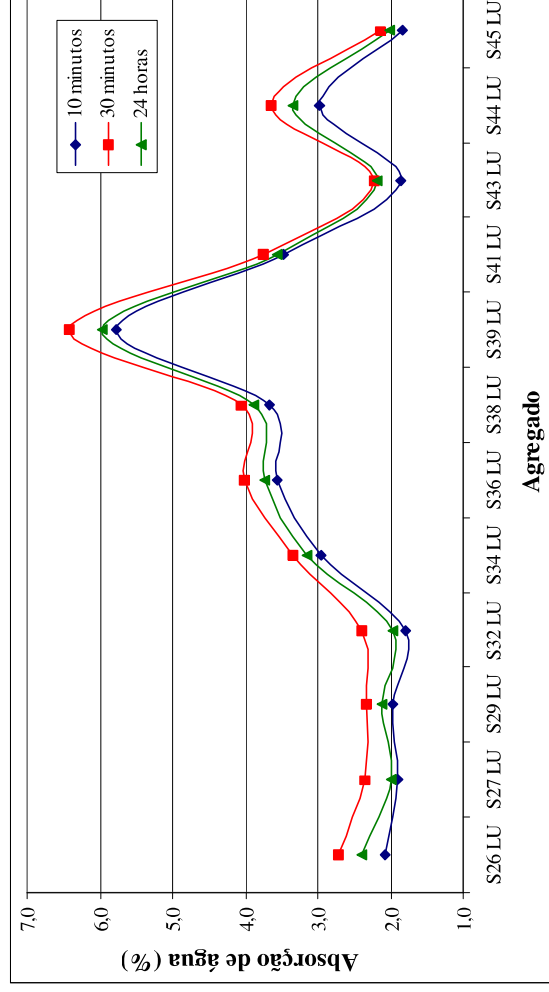


Figura 82: Absorção de água de 12 amostras de areias recicladas lavadas em peneira vibratória, durante a Fase 4, em diferentes tempos de imersão em água.

Pelos resultados, considera-se que um tempo de imersão maior ou igual a 30 minutos, porém bem inferior a 24 horas, seria o ideal para o controle da absorção de água de agregados reciclados, pois, desta forma, estaria garantida a absorção máxima do agregado sem correr o risco de desagregar as partículas.

Entretanto, a diferença de resultados entre 10 e 30 minutos de absorção não é significativa. A NBR 9777/87 de agregados reciclados permite uma variação entre duas determinações de uma mesma amostra de 0,5% e a maior parte das diferenças medidas entre estes 2 intervalos de tempo foi menor ou próxima a este valor.

Aliás, esta proximidade entre os dois resultados mostra que a velocidade de absorção de água dos agregados é grande, tendo cerca de 85% da absorção total do agregado ocorrido nos primeiros 10 minutos (isso considerando que aos 30 minutos tem-se a absorção total).

Assim, considera-se que, quando se determina a absorção após uma hora de imersão, mas mede-se a consistência da argamassa após cerca de 17 minutos de mistura do agregado com a água, como feito nesta pesquisa, tem-se uma imprecisão de cálculo da água efetiva disponível, dos seus efeitos na consistência e em outras propriedades das argamassas frescas. Entretanto, como foi possível estabelecer boas correlações entre a consistência das argamassas e a absorção de água dos agregados, (item 6.4.2), entende-se que a questão fica resolvida do ponto de vista de controle de qualidade e que outras pesquisas de cunho científico deveriam ser feitas para esclarecer este comportamento baseadas na Ciência dos Materiais.

6.4.2 Variabilidade das argamassas no estado fresco, obtidas com o uso das técnicas de classificação visual do RCC e lavagem de areias recicladas em peneira vibratória

A Tabela 86 resume os resultados de variabilidade obtidos para as argamassas de areias recicladas não lavadas e que continuaram não alcançando os valores assumidos como de especificação para a produção (item 5.9). Em comparação com a Fase 1, a amplitude de variação da densidade de massa das argamassas frescas até cresceu.

Assim, considera-se que apenas a classificação visual da natureza do RCC não trouxe benefícios para a redução da variabilidade das propriedades das argamassas no estado fresco, em se tratando de amostras de areias não lavadas.

Tabela 86: Variabilidade das propriedades no estado fresco das argamassas feitas com 20 amostras de areias recicladas não lavadas, S26 NL a S45 NL, com H total de 27,8% e relação água/cimento igual a 2,5. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo E1.

	Consistência (mm)	Densidade de massa fresca (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)	Teor de ar aprisionado (%)*
Mínimo	243	1678	146	5,7
Máximo	321	1902	165	13,7
Amplitude	78	224	19	8,0
Média	290	1825	159	9,5
DP total	22	56	5	3,0
CV total (%)	8	3	3	32

* Obtido para um total de 6 amostras apenas.

Os resultados apresentados na Tabela 87 para as argamassas feitas com as amostras de areias recicladas lavadas, S26 LU a S45 LU, referem-se a média de 5 determinações (5 misturas de argamassas) para cada uma das 20 amostras lavadas.

Tabela 87: Variabilidade das propriedades no estado fresco das argamassas feitas com 20 amostras de areia reciclada lavada, S26 LU a S45 LU, com relação água/cimento igual a 2,6 e na proporção 1:1:8 em massa seca (cimento, cal, areia lavada). Os resultados individuais das amostras estão nos Anexos E2 e E3.

	H efetivo (%)	a/c efetivo	Consistência (mm)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de ar aprisionado (%)
Mínimo	18,1	1,81	192	1723	138	6,5
Máximo	22,8	2,28	318	1869	150	13,0
Amplitude	4,7	0,47	126	146	11	6,5
Média	21,1	2,11	263	1784	143	10,3
DP total	1,5	0,15	31	35,5	5	2,0
DP ensaio	-	-	5,3	7,4	-	-
DP produção	-	-	30,5	34,7	-	-
CV total (%)	7	7	11,8	2	6	19
CV ensaio (%)	-	-	2,0	0,4	-	-

Comparando-se os resultados da Tabela 87 com os da Tabela 86, observa-se que a lavagem dos agregados foi útil para reduzir a amplitude de variação das propriedades de densidade de massa fresca, consumo de cimento e teor de ar aprisionado.

A Figura 83 apresenta a ótima correlação entre a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar aprisionado, já esperada uma vez que o teor de ar é calculado em função da densidade fresca.

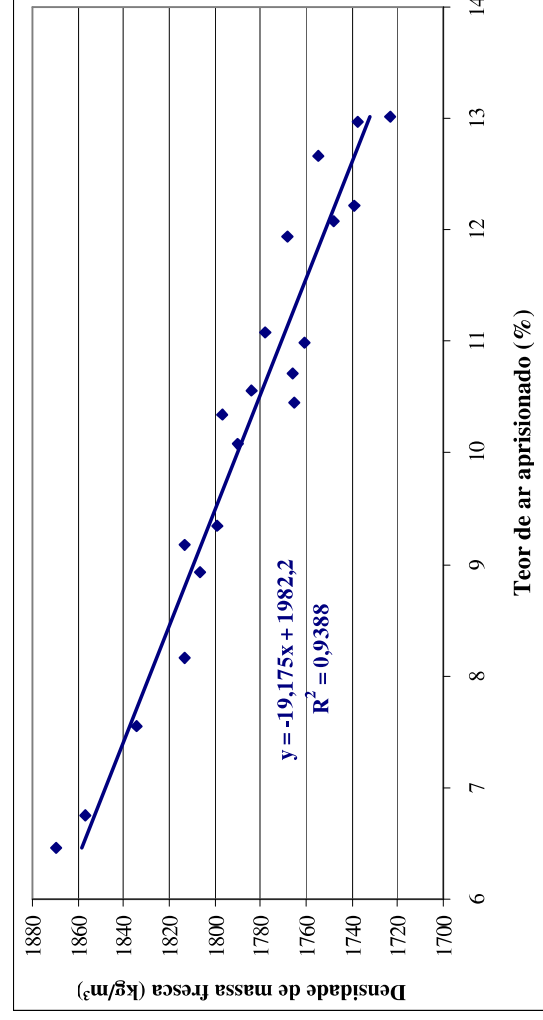


Figura 83: Correlação entre a densidade de massa fresca e o teor de ar aprisionado para as argamassas feitas com 20 amostras de areias recicladas lavadas em peneira vibratória, na Fase 4.

Para a consistência, os resultados obtidos são insuficientes para caracterizar um processo de produção sob controle, uma vez que, ao se fixar a relação a/c, foram obtidas argamassas muitos secas ou muito fluidas, impróprias para aplicação em alvenarias e totalmente fora de um processo controlado, como mostra a Figura 84.

Aliás, a medida de consistência para um teor fixo de água em traço constante, associada à densidade de massa fresca, podem então se tornar parâmetros indiretos e muito práticos de controle de qualidade da areia reciclada para a produção de argamassas

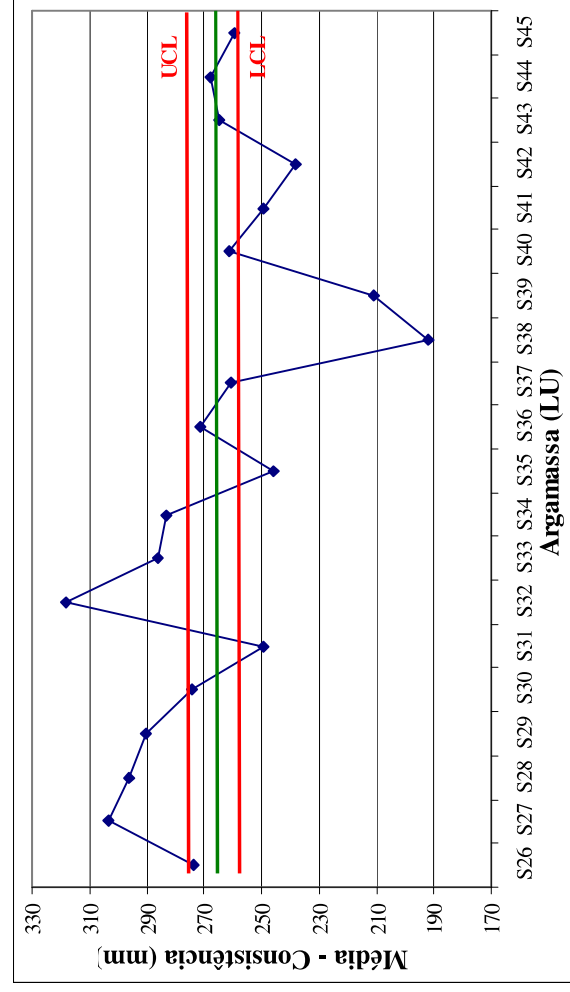


Figura 84: Gráfico de controle da média para a consistência, com diversos pontos excedendo os limites de controle.

Esta grande variação da consistência é justificada pela considerável variabilidade da absorção dos agregados, como mostra a Figura 85.

Pela Figura 85 pode-se constatar que a consistência das argamassas está variando em função da absorção do agregado. Considerando a regressão linear de maior índice de correlação, no qual os 3 pontos mais dispersos foram excluídos, o intervalo de variação de consistência de 50 mm e considerando uma margem de segurança devido ao erro residual, tem-se que a absorção do agregado deve ter uma amplitude máxima de 3,5%.

Comparando agora os resultados das Fases 3 e 4 para as amostras lavadas, observa-se que os resultados da Fase 3 tiveram menor variação tanto para a densidade de massa fresca quanto para o consumo de cimento. Porém, isto não significa que a classificação visual e o aproveitamento apenas da fração que sai do moinho para produção de argamassas tenha piorado a qualidade do material.

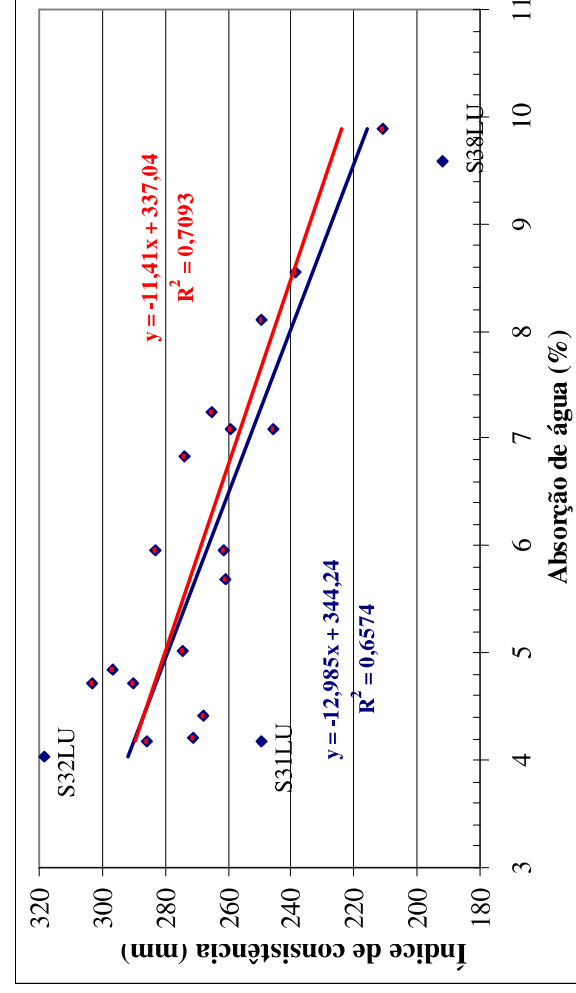


Figura 85: Correlação entre a consistência das argamassas e a absorção de água das 20 amostras de areia reciclada lavada (LU) em peneira vibratória.

A questão é que, na Fase 3, os materiais foram lavados em laboratório removendo-se toda a fração de material < 0,15 mm das amostras. Além disso, na Fase 3 os resíduos eram lançados uns sobre os outros ao descarregar da caçamba, podendo isto ter auxiliado na homogeneização de RCC, enquanto na Fase 4 cada caçamba foi considerada um lote e dela feita a reciclagem e a retirada de uma amostra, ou seja, a pior condição de variabilidade.

Aplicando-se as ferramentas de controle estatístico de processo para a densidade de massa fresca, também são obtidos muitos pontos fora dos limites de controle, mostrando que ainda é necessário melhorar o processo para adequar esta propriedade ao nível de controle 3σ .

6.4.3 Variabilidade das argamassas no estado endurecido, obtidas com o uso das técnicas de classificação visual de RCC e lavagem das areias recicladas em peneira vibratória

A Tabela 88 apresenta um resumo da variabilidade dos resultados de resistência mecânica das argamassas feitas com as amostras de areias recicladas não lavadas e lavadas, na Fase 4.

Mais uma vez, com a lavagem dos agregados e a inclusão da cal, obteve-se aumento das resistências mecânicas.

Comparativamente à Fase 3, as argamassas produzidas na Fase 4 com amostras lavadas resultaram com maiores resistências, mas também com maior variabilidade.

Tabela 88: Variabilidade das propriedades no estado endurecido das argamassas feitas com as amostras S26 a S45, lavadas e não lavadas, com relação a/c das argamassas fixa em 2,5 para as amostras NL e em 2,6 para as amostras LU. Os resultados individuais das amostras estão nos Anexos F4 e F6.

	S26 NL a S45 NL		S26 LU a S45 LU	
	Tração (MPa)	Compressão (MPa)	Tração (MPa)	Compressão (MPa)
Mínimo	0,28	1,39	0,66	4,27
Máximo	0,85	4,32	1,57	7,26
Amplitude	0,57	2,93	0,91	2,99
Média	0,62	3,04	1,04	5,97
DP total	0,17	0,85	0,22	0,98
DP do ensaio	-	-	0,17	0,36
DP da produção	-	-	0,14	0,91
CV total (%)	27	28	21	16
CV do ensaio (%)	-	-	16,6	6,0

De fato, esta maior variabilidade da Fase 4 é justificada pelo processo ineficiente de lavagem adotado nesta fase, como comprovado pela Figura 88.

Pela Tabela 88, pode-se considerar que os resultados obtidos tanto para a resistência à compressão quanto para a resistência à tração das argamassas feitas com as amostras de areias recicladas lavadas estão dentro dos limites de especificação estipulados como meta do projeto.

Entretanto, ao se construir os gráficos de controle de processo para as duas propriedades, observa-se que ambas estão fora de controle, como mostram a Figura 86 e a Figura 87, embora deva-se observar que os limites de controle estão muito próximos, tornando difícil a obtenção de um processo sob controle estatístico.

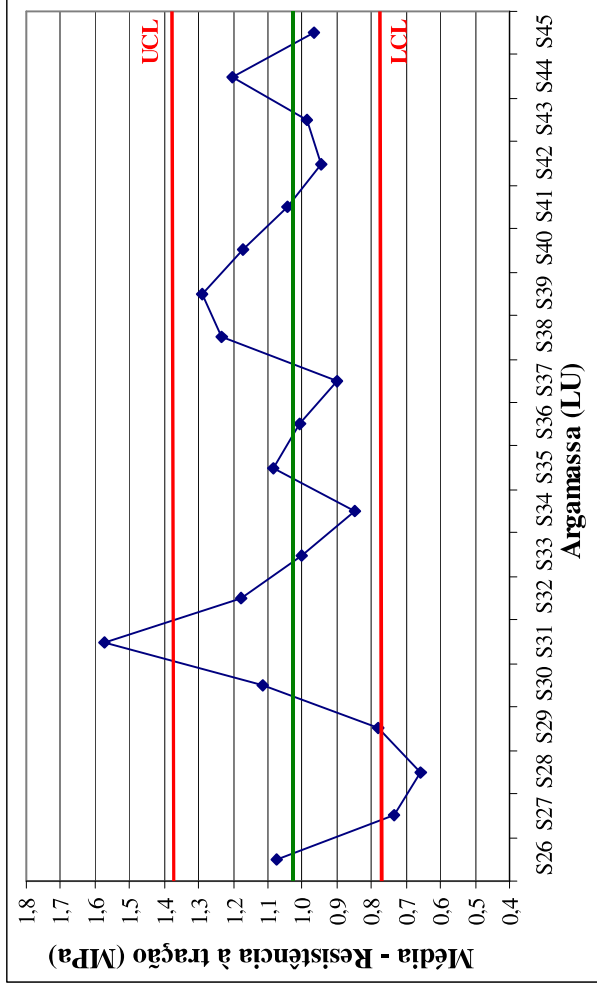


Figura 86: Gráfico de controle da média para a resistência à tração na flexão, com 3 pontos excedendo os limites de controle.

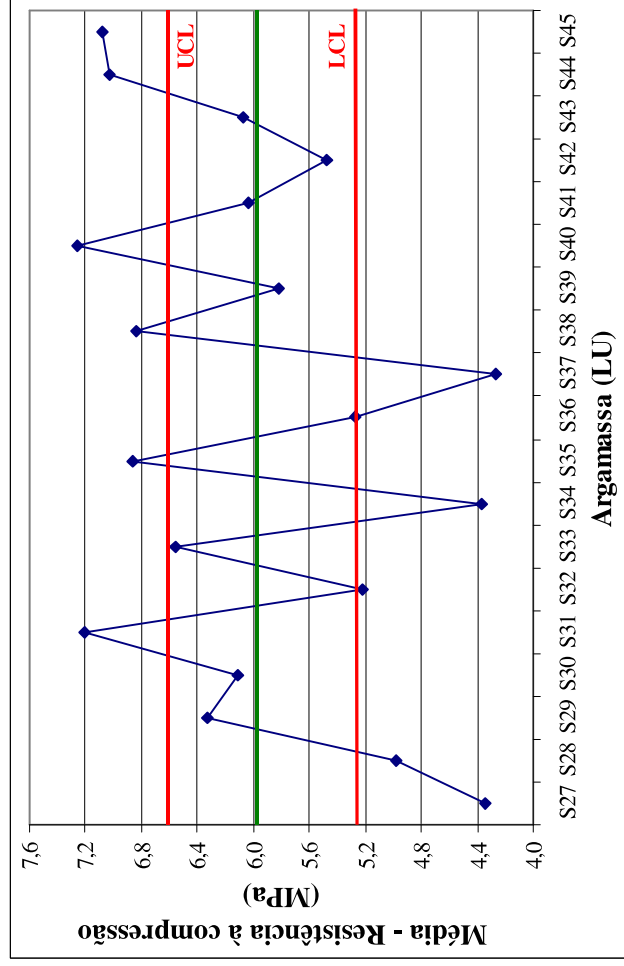


Figura 87: Gráfico de controle da média para a resistência à compressão, com diversos pontos excedendo os limites de controle.

Analisando a Figura 88, que mostra a correlação entre a resistência à compressão e o teor total de finos < 75 µm da argamassa, tem-se que, para se conseguir limitar a resistência à compressão das argamassas nos limites de controle da Figura 87, a amplitude de variação do teor de finos < 75 µm de 3% seria suficiente. Entretanto, é provável que isto não aconteça, uma vez que resultados com menor dispersão retornariam intervalos ainda mais estreitos. De qualquer forma, considerou-se esta amplitude uma boa meta a ser atingida na próxima fase, mas sem ultrapassar o teor máximo de 5%, conforme os resultados obtidos no item 6.3.4.

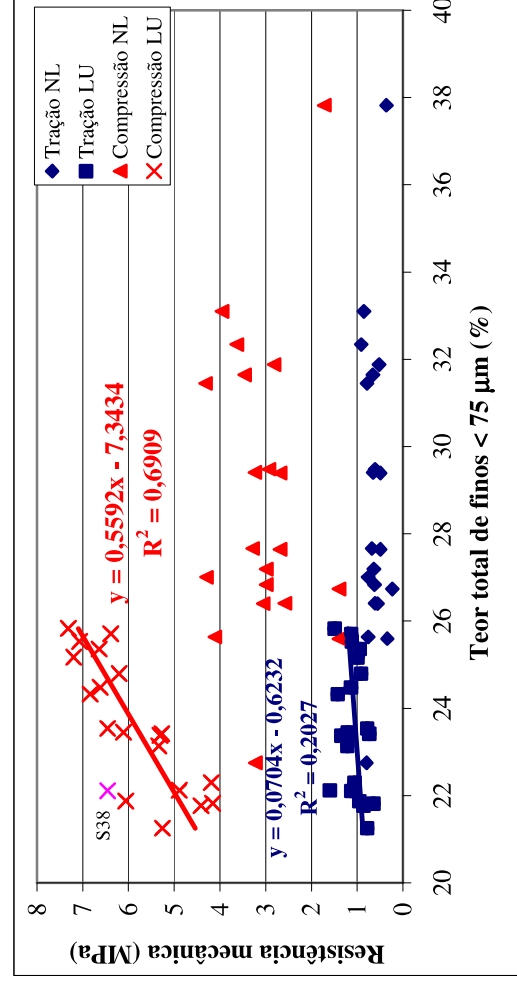


Figura 88: Correlação entre a resistência mecânica e o teor total de finos < 75 µm das argamassas com areias recicladas lavadas na usina (LU) e não lavadas (NL), na Fase 4 da pesquisa.

6.4.4 Avaliação do desempenho dos revestimentos produzidos com o uso das técnicas de classificação visual do RCC e lavagem de areias recicladas em peneira vibratória

Foram produzidos e caracterizados no laboratório do CPqDCC 9 painéis de revestimento de argamassa na proporção 1:1:8 (cimento, cal e areias recicladas lavadas, em massa seca), sarrafeados e desempenados, sobre substrato de bloco de concreto com chapisco, na espessura de 1,5 cm, conforme a Figura 89 e resultados resumidos na Tabela 89.

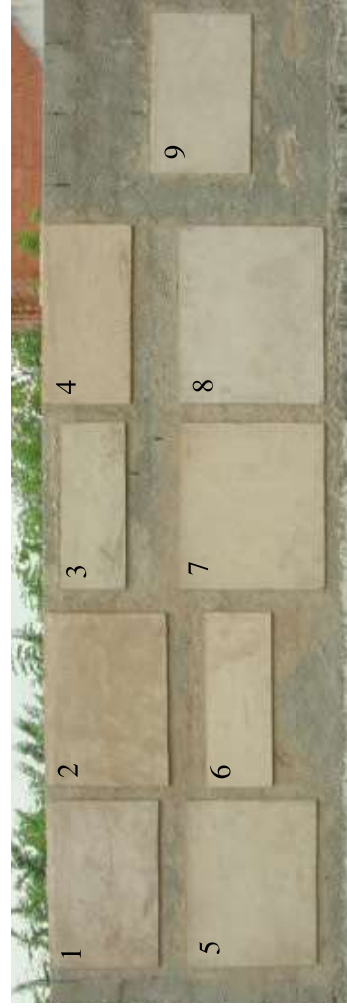


Figura 89: Revestimentos produzidos durante a Fase 4 da pesquisa com areias recicladas obtidas através da lavagem em peneira vibratória. Substrato de bloco de concreto com chapisco, espessura dos revestimentos de 1,5 cm.

A consistência das argamassas aplicadas variou entre 287 e 333 mm, mostrando que é possível aplicar argamassas em alvenarias com uma amplitude de variação de cerca de 50 mm.

Pelos resultados obtidos de densidade de massa fresca e dosagem dos materiais, tem-se que uma variação de 150 kg/m^3 na densidade de massa significaria uma variação de, aproximadamente, 10% na área produzida de revestimento, o que pode ser considerada uma variação aceitável.

Tabela 89: Resultados de caracterização das argamassas e revestimentos produzidos durante a Fase 4 da pesquisa, com areias recicladas obtidas por lavagem em peneira vibratória.

Revestimento	Amostra LU	Consistência (mm)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	a/c total	a/c efetivo	Resistência (MPa)		Retração total (x10 ⁻⁶ mm/mm)	Aderência (MPa)	Fissura		Absorção capilar (ml em 15 min)
						Tração	Compressão			Total	cm/m ²	
1	S38/39	287	1759	3,6	2,8	0,43	2,4	3305	0,12	6	97	29,3
2	S26/35	290	1741	3,3	2,8	0,38	2,3	-	0,27	12	176	29,7
3	S32	295	1860	2,8	2,5	0,41	3,2	2896	0,21	15	691	17,0
4	S40	291	1833	1,6	1,1	0,37	2,6	3375	0,20	27	862	18,0
5	S43	333	1752	3,2	2,6	0,34	1,8	3071	0,15	13	307	21,0
6	S45	315	1835	3,2	2,6	0,32	2,3	3500	0,16	8	440	34,7
7	S44	315	1772	3,2	2,8	0,29	1,9	3016	0,15	17	416	26,0
8	S42	286	1699	3,6	2,9	0,25	1,2	2880	0,10	10	132	28,3
9	S41/S42	295	1806	3,4	2,7	0,21	1,6	-	0,16	15	554	29,3

Em relação às propriedades das argamassas no estado endurecido, as resistências mecânicas obtidas foram menores do que aquelas apresentadas no item 6.4.3, provavelmente devido à maior relação água/cimento utilizada aqui para se atingir uma consistência trabalhável. Quanto à retração por secagem, a variação foi menor que todos os resultados até então conseguidos.

Os revestimentos apresentaram uma fissuração variando em função do teor total de finos < 75 µm das argamassas, como indicado na Figura 90. Pode-se afirmar que nenhum revestimento apresentou um bom desempenho em relação à fissuração mesmo para os menores teores de finos dos agregados. Este alto nível de fissuração pode ter sido potencializado pela elevada finura dos agregados desta fase, que foram peneirados em peneira 1,2 mm em função de se desejar um melhor acabamento.

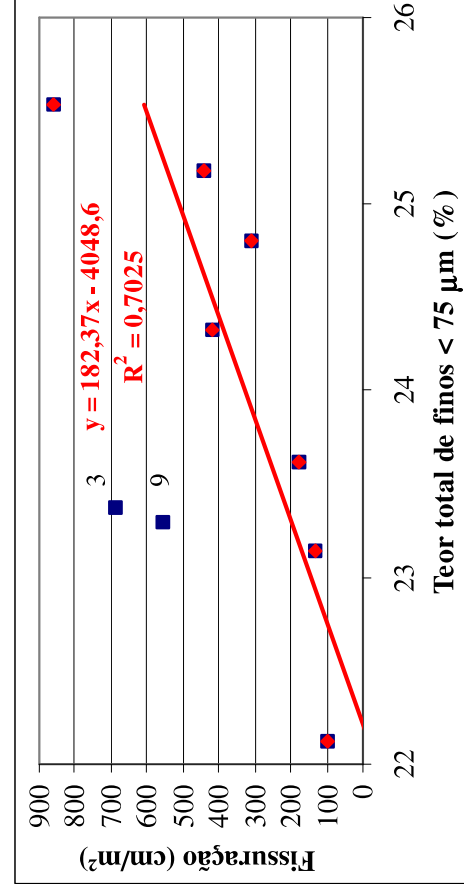


Figura 90: Fissuração dos revestimentos produzidos na Fase 4, em função do teor total de finos < 75 µm das argamassas.

Quanto à resistência de aderência à tração, com exceção dos revestimentos 1 e 9, os resultados ficaram bem próximos ou acima do limite mínimo da NBR 13528/95 para revestimentos internos, que é de 0,20 MPa. Entretanto, observou-se uma variação significativa nos resultados devido, principalmente, à variação da densidade de massa fresca das argamassas (Figura 91), o que é esperado de ocorrer, uma vez que menores densidades de massa significam aqui maiores teores de ar aprisionado que, por sua vez, diminuem os pontos de aderência da argamassa ao substrato.

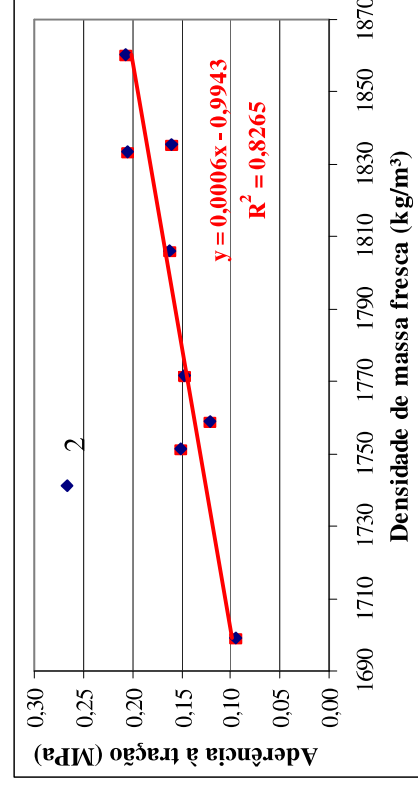


Figura 91: Correlação entre a resistência de aderência dos revestimentos ao substrato de bloco de concreto com chapisco e a densidade de massa fresca das argamassas da Fase 4, desconsiderando-se o resultado expúrio do revestimento 2.

A Figura 92 apresenta a variação da absorção capilar dos revestimentos em função da relação a/c total. O grau de correlação com esta propriedade somente não foi elevado, uma vez que a absorção capilar depende também da absorção de água dos agregados.

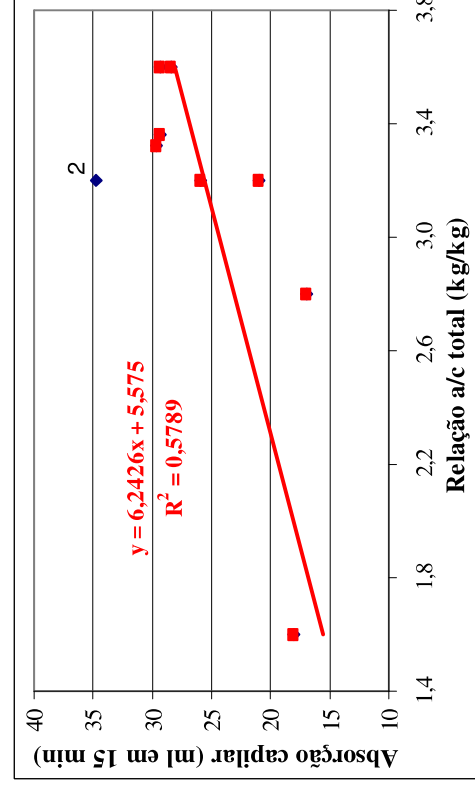


Figura 92: Correlação entre a absorção capilar dos revestimentos e a relação a/c total das argamassas.

Pela Figura 92, percebe-se que a absorção capilar dos revestimentos também variou largamente. Aliás, não só os resultados apresentados na Tabela 89, como a variação da cor dos revestimentos, que pode ser vista na Figura 89, mostraram que seria recomendável reduzir a variabilidade das areias recicladas, em busca de um produto com comportamento mais uniforme de cor e demais propriedades.

6.4.5 Resumo dos resultados obtidos na Fase 4

O objetivo desta fase foi verificar a eficácia do controle visual da natureza do RCC, com a utilização somente da fração que saía do moinho, na redução da variabilidade das propriedades dos agregados e argamassas. Através dos ensaios realizados, pode-se afirmar que:

- com exceção da densidade de massa aparente do agregado, para as demais propriedades dos agregados e das argamassas no estado fresco, feitas com as amostras não lavadas, a classificação visual do RCC não trouxe melhorias no processo;
- os resultados de consistência das argamassas feitas com as amostras lavadas indicaram que esta propriedade pode ser correlacionada com a absorção do agregado e que se deve reduzi-la para uma amplitude bem menor. Cálculos teóricos da mistura das amostras de 5 em 5 mostrou que é provável se atingir uma amplitude de variação da absorção de água de apenas 2,5%;
- o processo de lavagem dos agregados em peneira vibratória com posterior imersão em um tanque não resultou em uma boa lavagem, devido a diversas variações do sistema, resultando em grande variação do teor de finos das amostras. Isto fez com que as propriedades no estado endurecido sofressem maiores variações que na Fase 3, ficando fora de controle para todas as propriedades consideradas;
- foi possível obter uma correlação entre a resistência à compressão e o teor total de finos < 75 µm. Em função desses resultados, estabeleceu-se buscar na próxima fase uma amplitude máxima de 3% no teor de finos da areia reciclada e confirmar a validade deste intervalo;

- não foi possível obter resultados de resistência mecânica dentro de um controle estatístico de processo, embora eles não estejam fora dos limites de especificação definidos para este trabalho;
- quanto aos revestimentos, o grau de fissuração ficou bem correlacionado com o teor total de finos < 75 µm das argamassas e a resistência de aderência à tração com a densidade de massa fresca.

Assim, considera-se que os resultados de variabilidade obtidos nesta fase não foram melhores que na Fase 3 devido ao problema de lavagem dos agregados em campo. Entretanto, este problema foi útil na definição de possíveis limites de variação, tanto do teor de finos < 75 µm quanto da absorção dos agregados, que deverão ser buscados e confirmados na última fase da pesquisa.

A etapa de lavagem dos agregados não pode ser simplificada pelo método aqui avaliado, mas definiu-se modificar visando um processo mais controlado. Já a classificação visual do RCC, apesar de não ter retornado resultados satisfatórios na redução da variabilidade, ficou estabelecida para ser mantida no processo, não só pelas razões descritas no item 5.7, como também por questões comerciais.

6.5 Fase 5: Avaliação em campo da eficácia da lavagem em classificador espiral e homogeneização de areias recicladas, na diminuição da variabilidade das argamassas

6.5.1 Variabilidade das areias recicladas obtidas através da lavagem em classificador espiral, com formação de pilhas de homogeneização

A Tabela 90 apresenta um resumo dos resultados de caracterização das 10 pilhas de areia reciclada, lavadas e homogeneizadas, conforme descrito no item 5.8, sendo os valores de cada pilha obtidos pela média dos resultados das 3 amostras formadoras de cada pilha (os valores de cada amostra encontram-se no Anexo C).

Para todas as propriedades desta tabela, a lavagem em classificador espiral com a formação de pilhas de homogeneização se mostraram muito eficientes na redução da variabilidade, pelos resultados de todas as propriedades que se mostraram de menor variabilidade do que aqueles obtidos na Fase 4.

No caso das propriedades de absorção de água e teor de finos < 75 µm, que são as que possuem maiores variações e que devem ser muito bem controladas devido à sua influência em diversas propriedades das argamassas, o emprego dessas duas técnicas no processo de reciclagem retornaram resultados que podem ser considerados excelentes.

O processo de lavagem em classificador espiral conseguiu reduzir o valor máximo do teor de finos < 75 µm nas areias recicladas para 3,2%, bem inferior ao valor de 5% definido como meta na Fase 3 e aos valores definidos pelas normas NBR 15116/04 e prEN 13138/01. Além disso, a amplitude de variação ficou em apenas 1,7%, também bem inferior ao valor de 3% estimado como meta a partir da Fase 4.

Tabela 90: Variabilidade das 10 propriedades de 10 pilhas de areias recicladas produzidas na usina de Socorro/SP, com a aplicação das técnicas de lavagem em classificador espiral e formação de pilhas de homogeneização. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo C2.

	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Densidade de massa específica* (kg/m ³)	Absorção de água (%)	Teor de finos < 75 µm (%)	Teor de sulfatos de finura solúveis (%)
Mínimo	1148	2598	5,4	1,4	2,2
Máximo	1244	2662	7,8	3,2	2,5
Amplitude	96	64	2,4	1,7	0,3
Média	1188	2629	5,9	2,3	2,4
DP total	34	17	0,8	0,6	0,11
DP do ensaio	19,2	-	0,7	0,5	0,10
DP da produção	28,2	-	0,4	0,30	0,04
CV total (%)	2,9	0,6	13	24	4,6
CV ensaio (%)	1,6	-	11	20	4,2

Para a absorção de água dos agregados, foi obtida uma amplitude de variação bem inferior ao obtido na Fase 4, de apenas 2,5%, o que pode ser considerado um ótimo resultado contra 5% da Fase 4.

A Figura 93 apresenta a distribuição granulométrica de uma das sub-amostras de cada pilha da Fase 5, com menores amplitudes de variação para os tamanhos de

0,3 e 0,6 mm do que aquelas encontradas na Fase 4 (item 6.4.1), provavelmente causada pela melhor lavagem da areia e sua homogeneização, uma vez que a granulometria formada é dependente da natureza do material britado.

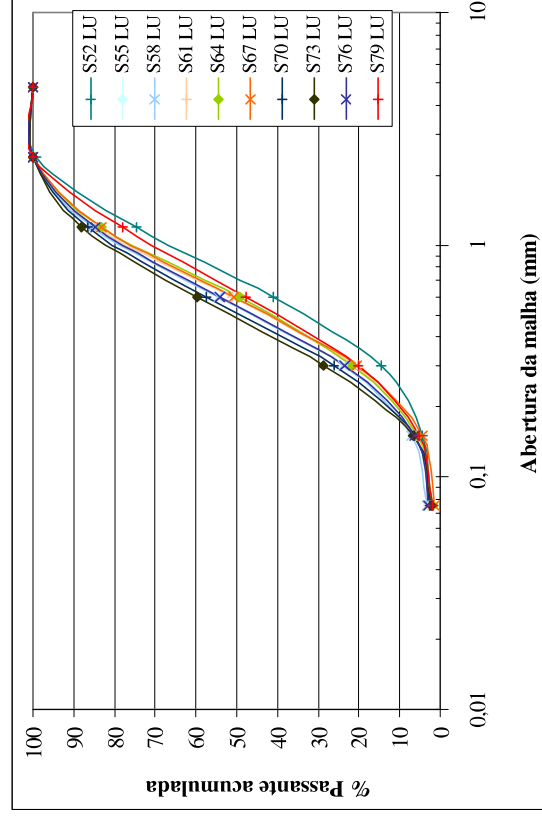


Figura 93: Distribuição granulométrica de uma das 3 sub-amostras constituintes de cada pilha da Fase 5.

Em relação à variação dos resultados dentro de uma mesma pilha, os resultados da Figura 94 para a absorção de água, por exemplo, mostram que esta variação é insignificante, mesmo tendo algumas amostras de uma mesma pilha se distanciado mais de 1% no resultado, o que pode ter ocorrido por variação no ensaio ou problemas na coleta, como, por exemplo, a não remoção de uma seção transversal completa. Resultados ainda melhores de variação dentro da mesma pilha foram conseguidos para o teor de finos < 75 μm . Assim, pode-se considerar que qualquer seção transversal da pilha foi bem representativa de suas características.

Em relação aos resultados obtidos na Fase 1, o teor médio de sulfatos solúveis, máximo e a amplitude de variação diminuíram, provavelmente, como um resultado positivo do processo de lavagem.

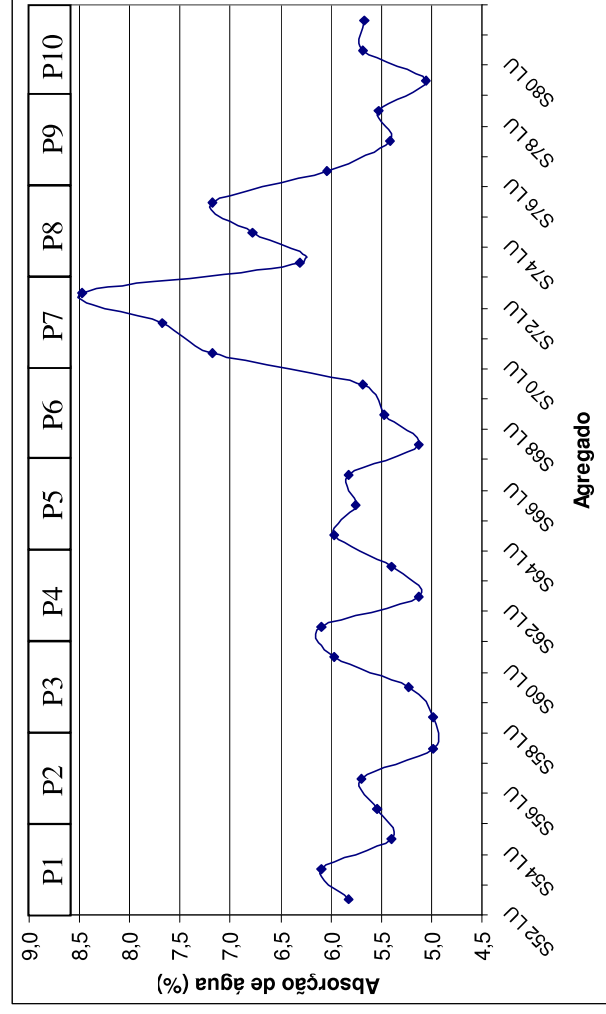


Figura 94: Resultados de absorção de água de todas as 30 sub-amostras da Fase 5, sendo que cada 3 resultados se referem a amostra representativa de uma pilha, no total das 10 formadas.

Assim, os resultados dos ensaios químicos (Anexo C.4) mostram que todas as 10 amostras de areia reciclada lavada possuem um baixo teor de sulfatos solúveis e sais solúveis totais, bem inferiores aos limites de normas nacionais e estrangeiras mostradas no item 2.10, como o da NF P 18541, onde o teor de sulfatos solúveis (em SO_4^{2-}) permissível é limitado em 0,15%. Pelos critérios do IGS, a maioria das amostras podem ser classificadas como de Nível 1, com pequeno risco de danos.

Os resultados de difratometria de raios X (Anexo C.5) indicam que as fases cristalinas de todas as amostras da Fase 5 são muito semelhantes, comprovando o efeito positivo do processo de lavagem e homogeneização.

Com relação à determinação do teor de finos < 75 μm dos agregados, cabe aqui, como foi feito na Fase 4, uma discussão comparativa quanto aos seguintes métodos: laser e NBR 7219/87.

A Figura 95 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos através destes dois métodos. Os resultados obtidos pelo laser quando o meio de dispersão é o álcool (Anexo D) estão bem superiores aos da NBR 7219/87 e do próprio laser

quando o meio é água. Entretanto, é possível observar visualmente que as amostras lavadas nesta fase não possuíam teores de finos superiores a 10%. Considerando que a massa de material utilizada durante o ensaio pelo laser é pequena (cerca de 10g), é possível que tenha ocorrido ou uma falha de amostragem ou havia presente na amostra algum tipo de material que se solubilizou na presença de álcool. Outra possibilidade que não pode ser descartada é a ocorrência de um nível de dispersão dos finos muito superior ao que ocorre na água e isto, como já dito, precisa ser melhor avaliado por pesquisas específicas.

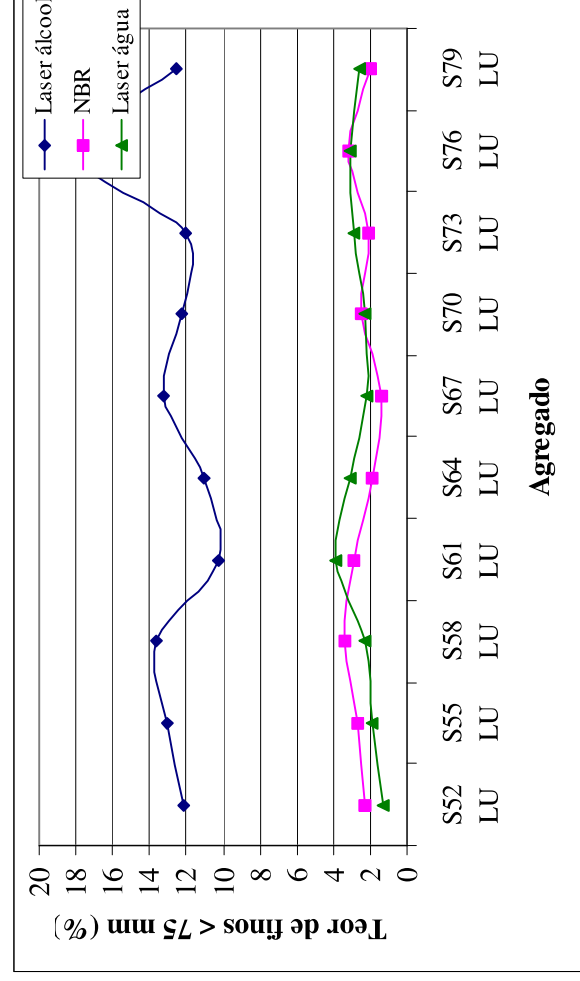


Figura 95: Comparação entre os teores de finos < 75 µm dos agregados lavados obtidos pelos métodos laser (meio álcool e água) e NBR 7219/87.

Como já comentado na análise de dados da Fase 4, os resultados de teores de finos < 75 µm obtidos pelo método da NBR 7219/87 e pelo laser em água é o que foram assumidos.

A mesma conclusão acima foi obtida na Fase 4 para as amostras LU. Para as amostras não lavadas NL, consideram-se confiáveis apenas os resultados obtidos pela NBR 7219/87.

6.5.2 Variabilidade das argamassas no estado fresco, obtidas através da lavagem em classificador espiral e com formação de pilhas de homogeneização

A variação dos resultados das propriedades das argamassas no estado fresco reduziu para algumas propriedades em relação à Fase 4.

A redução de variabilidade da relação água/cimento efetiva e da relação água / materiais secos efetiva (Tabela 91) se deve à redução da variabilidade da absorção de água dos agregados, obtendo-se resultados satisfatórios.

Tabela 91: Variabilidade das propriedades no estado fresco das argamassas feitas com 10 pilhas de homogeneização de areia reciclada lavada em classificador espiral. Os resultados individuais das amostras estão no Anexo E2.

	H efetivo (%)	Relação a/c efetivo (kg/kg)	Consistência (mm)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de ar aprisionado (%)
Mínimo	19,8	1,98	277	1733	138	2,6
Máximo	21,7	2,17	346	1924	153	12,3
Amplitude	1,9	0,19	69	191	15	9,7
Média	21,3	2,13	318	1850	147	6,6
DP total	0,6	0,06	18	62	5	3,2
DP ensaio	-	-	6,0	23	-	-
DP produção	-	-	17,2	57,6	-	-
CV total (%)	2,9	2,9	5,7	3,4	3,4	48
CV ensaio (%)	-	-	1,9	1,3	-	-

Os índices de consistência aqui obtidos são maiores que os da Fase 4 devido, principalmente, ao menor teor total de finos < 75 µm e maior módulo de finura dos agregados desta fase, mas a variabilidade diminuiu, se comparados os resultados da Tabela 91 com aqueles da Tabela 87.

Teria sido possível manter a consistência das argamassas na amplitude de variação de 50 mm se não fosse apenas a pilha P8 que atingiu o valor máximo de índice de consistência de 346 mm, sendo os resultados de suas 3 sub-amostras discrepantes na correlação entre o índice de consistência da argamassa e a absorção de água do agregado (Figura 96).

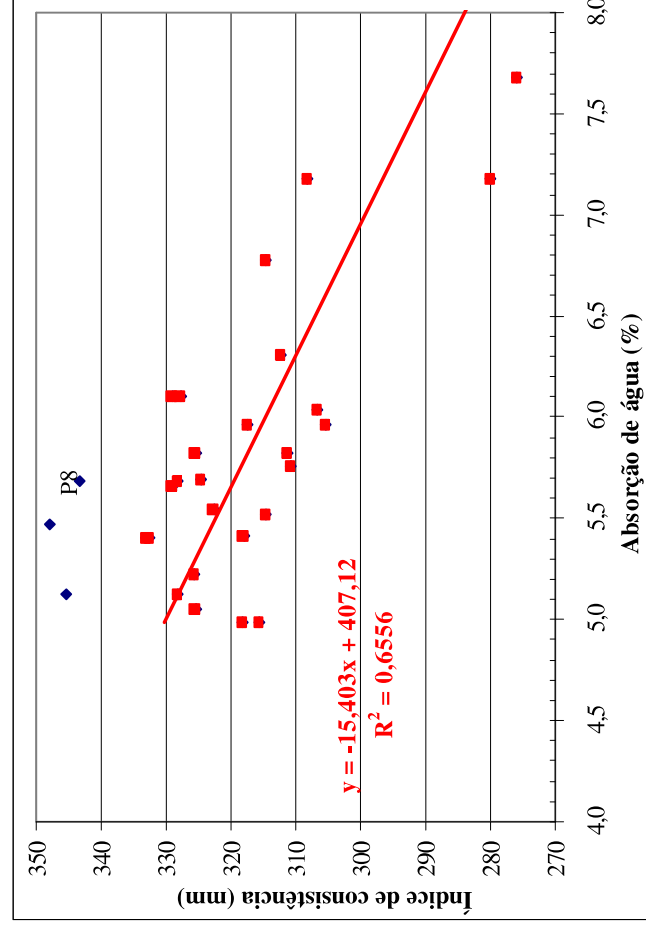


Figura 96: Correlação entre o índice de consistência das argamassas e a absorção de água das amostras de areia reciclada da Fase 5, para 27 das 30 sub-amostras obtidas.

Este valor discrepante de consistência da pilha P8 pode ser explicado pela influência conjunta de duas outras propriedades na consistência, que são seu baixo teor de finos < 75 μm (é o menor valor obtido, de 1,4%) e, principalmente, seu alto teor de ar aprisionado (é o valor máximo obtido, de 12%).

A influência do teor de finos < 75 μm na consistência pode ser vista na Figura 97, onde a inclusão desta propriedade no gráfico, como denominador da água efetiva presente na mistura (que é calculada em função da absorção do agregado), melhorou a correlação entre as propriedades.

Já a influência do teor de ar aprisionado na consistência pode ter sido mais importante que a do teor de finos pela sua maior amplitude de variação. A Figura 98 mostra um índice de correlação de aproximadamente 0,78 entre as duas propriedades quando são desconsiderados os resultados das pilhas P9 e P12. A desconsideração destes pontos é justificada principalmente pelo seus valores extremos de absorção de água (7,8% da P9), de teor de finos < 75 μm e módulo de finura (1,7% e 2,53, respectivamente, para a P12).

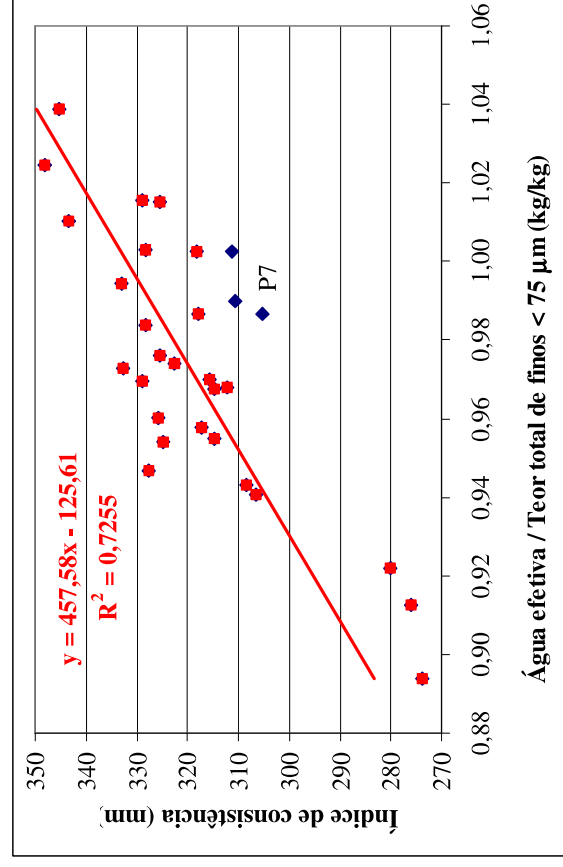


Figura 97: Correlação entre o índice de consistência das argamassas e a relação água efetiva / teor total de finos < 75 μm . Para a correlação de 0,72 foram desconsiderados os 3 pontos discrepantes relativos à pilha P7.

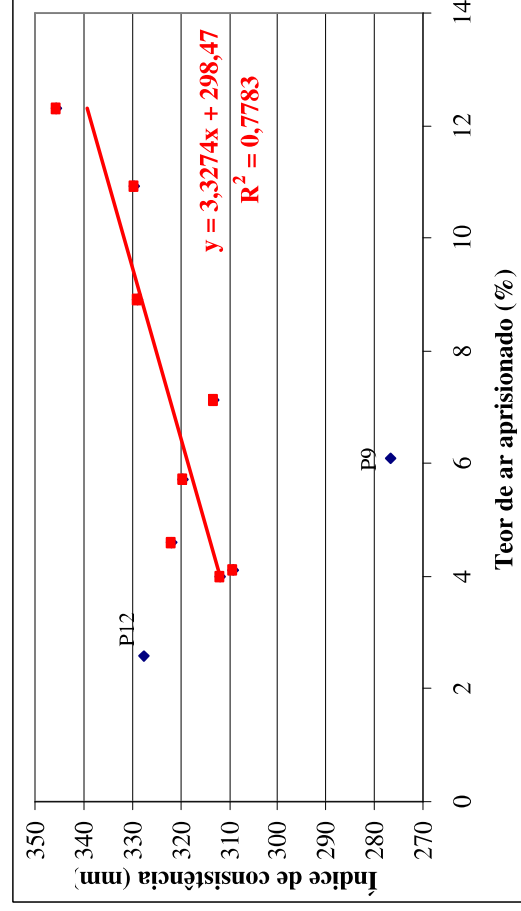


Figura 98: Correlação entre o índice de consistência das argamassas e o teor de ar aprisionado.

Ou seja, quanto à consistência, fica clara a importância de se ter um processo que controle as 3 seguintes propriedades: teor de finos < 75 μm , absorção de água e teor de ar aprisionado.

A influência dessas 3 propriedades na consistência das argamassas é facilmente explicada. O agregado reciclado, ao absorver água para seu interior, retira uma parcela de água livre do sistema, presente entre os grãos e responsável por dar fluidez à argamassa, prendendo-a em seus poros. Esta água removida do sistema faz reduzir a fluidez da pasta e aumentar a sua coesão com redução do índice de consistência.

Quanto ao teor de finos, quanto maior for, maior a água de molhagem do agregado pelo aumento da área superficial, necessitando assim de maior quantidade de água para uma mesma consistência. Quanto ao teor de ar aprisionado, assim como a água, este diminui o atrito entre as partículas, tornando a argamassa mais fluida.

Deve-se considerar também que a absorção de água do agregado deve introduzir um volume equivalente de ar na pasta, podendo causar um efeito ainda maior sobre as propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

Pode-se afirmar que as duas primeiras já estão bem controladas através das técnicas de lavagem e homogeneização. A terceira ainda deve ter sua variação reduzida.

Pela Figura 98, tem-se que cada 10% de variação do teor de ar aprisionado causaria uma variação de 33 mm na consistência da argamassa. Entretanto, considerando que outras propriedades também influenciam na consistência, a variação encontrada pode ser maior que esta.

É interessante ainda observar que, na Fase 4, onde a amplitude de variação do teor de ar aprisionado foi menor (6,6%), não se observou correlação entre a consistência e o teor de ar. Sendo assim, como sugestão, considera-se interessante que a amplitude de variação do teor de ar não ultrapassasse de 7%.

As propriedades de densidade de massa no estado fresco e consumo de cimento por m³ apresentaram aumento na amplitude de variação causada pelo aumento de variação do teor de ar aprisionado, em relação à Fase 4.

A correlação encontrada na Fase 4 entre a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar aprisionado se repetiu aqui com uma equação bem semelhante. Pela Figura 99 tem-se novamente que uma variação de 10% no teor de ar aprisionado

causaria uma variação de 192 kg/m³ na densidade de massa fresca, como na fase anterior.

Sendo assim, considerando a facilidade e a precisão do ensaio de densidade de massa fresca, é mais interessante fixar um intervalo de variação dessa propriedade do que fixar o controle para o teor de ar aprisionado.

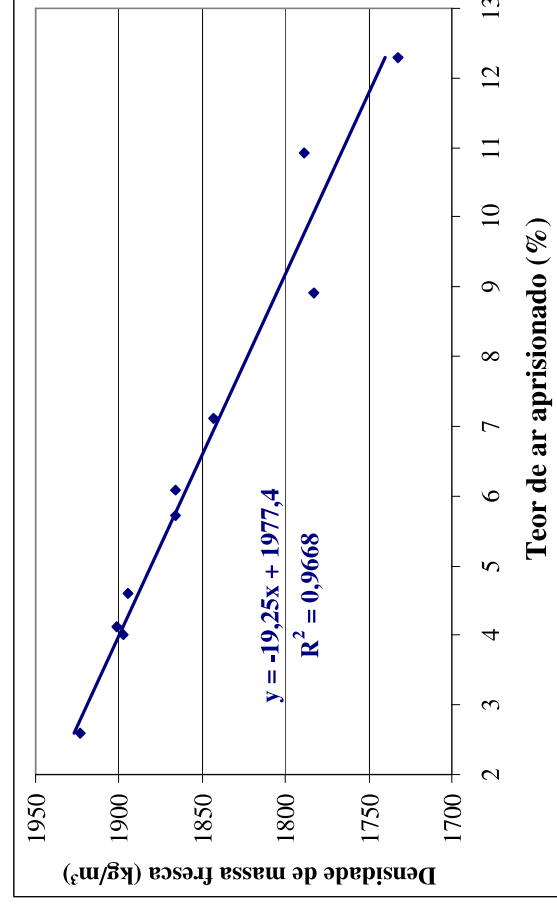


Figura 99: Correlação entre a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar aprisionado.

Aliás, em relação à densidade de massa fresca, sua variação ficou < que o limite da classificação da NBR 13281/05, considerado muito amplo, podendo resultar em grandes diferenças de rendimento.

O custo da argamassa com areia reciclada para o consumidor final, calculado conforme a Equação 20, na dosagem utilizada nesta pesquisa e com o valor médio encontrado para o agregado da Fase 5, é de R\$83,45 por m³, sendo o preço do cimento de R\$0,25/kg e da cal de R\$0,15/kg. Este custo seria equivalente a 81% do custo do m³ da argamassa na mesma dosagem feita com agregado natural, considerando que o preço da areia de rio era de R\$42,00/m³ na cidade de Socorro/SP, em dezembro de 2004.

6.5.3 Variabilidade das argamassas no estado endurecido, obtidas através da lavagem em classificador espiral e com formação de pilhas de homogeneização

A Tabela 92 apresenta um resumo dos resultados de caracterização das argamassas no estado endurecido.

Comparando as amplitudes de variação dos resultados obtidos com as especificações nacionais e internacionais, pode-se afirmar que:

- a resistência à compressão variou numa amplitude de 3 MPa, inferior ao definido pela prEN 998-1/93 e próximo ao limite da NBR 13281/05;
- a resistência à tração na flexão variou entre 0,39 e 0,79 MPa, dentro da classificação 1 da MERUC e da NBR 13281/05 que especificam argamassas com resistência < 1,5 MPa;
- o módulo de elasticidade variou entre 1,4 e 3 GPa, se enquadrando com folga na classificação 1 da MERUC (< 5 GPa), ainda que os valores devam ser comparados com certa reserva, uma vez que aqui o módulo foi determinado por ultrassom e na MERUC por ressonância;
- a densidade de massa endurecida variou numa amplitude de apenas 175 kg/m³, bem inferior aos limites da MERUC de 400 kg/m³;
- de acordo com a NBR 13281/05, a absorção capilar das argamassas seria classificada como C6, uma vez que todas apresentaram coeficiente de capilaridade > 10 g/dm².min^{0,5}.

Tabela 92: Caracterização das argamassas no estado endurecido feitas com as 10 pilhas de areias recicladas produzidas na usina de Socorro, com a aplicação das técnicas de lavagem em classificador espiral e formação de pilhas de homogeneização. Os resultados individuais de resistência mecânica das amostras estão no Anexo F7.

	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Retração por secagem 30 dias 10^{-6} mm/mm)	Densidade de massa endurecida (kg/m^3)	Absorção capilar (kg/m^2 em 24 h)
Mínimo	0,39	2,1	1,4	2603	1330	14
Máximo	0,79	4,9	3,0	4310	1505	19
Amplitude	0,40	2,8	1,6	1707	175	5
Média	0,57	3,6	2,2	3355	1446	16
DP total	0,13	0,8	0,4	481	62	1,9
CV total (%)	24	23	20	14	4	12

6.5.3.1 Resistência mecânica

Para as resistências mecânicas, o valor obtido nesta fase foi inferior ao encontrado na Fase 4 para uma mesma proporção de mistura e consumo de água, o que provavelmente foi causado pelo aumento no diâmetro médio dos poros devido à redução do teor de finos $< 75 \mu\text{m}$ na argamassa pelo processo de lavagem e pelo aumento expressivo do módulo de finura da areia reciclada, uma vez que na Fase 4 a areia reciclada foi peneirada na peneira de 1,2 mm e aqui na peneira de 2,4 mm.

Não se considera que a alteração da temperatura de secagem em estufa, de 100°C para 40°C , possa ter influenciado na resistência mecânica de forma significativa, como mostra a Figura 100.

Entretanto, houve uma redução na amplitude de variação dos resultados, principalmente da resistência à tração na flexão, onde a amplitude de apenas 0,40 MPa pode ser considerada bem satisfatória. Aliás, esta redução maior de amplitude de variação na resistência à tração do que na resistência à compressão pode ter sido resultado da redução da variação dos finos $< 75 \mu\text{m}$, que causaram menor microfissuração das argamassas.

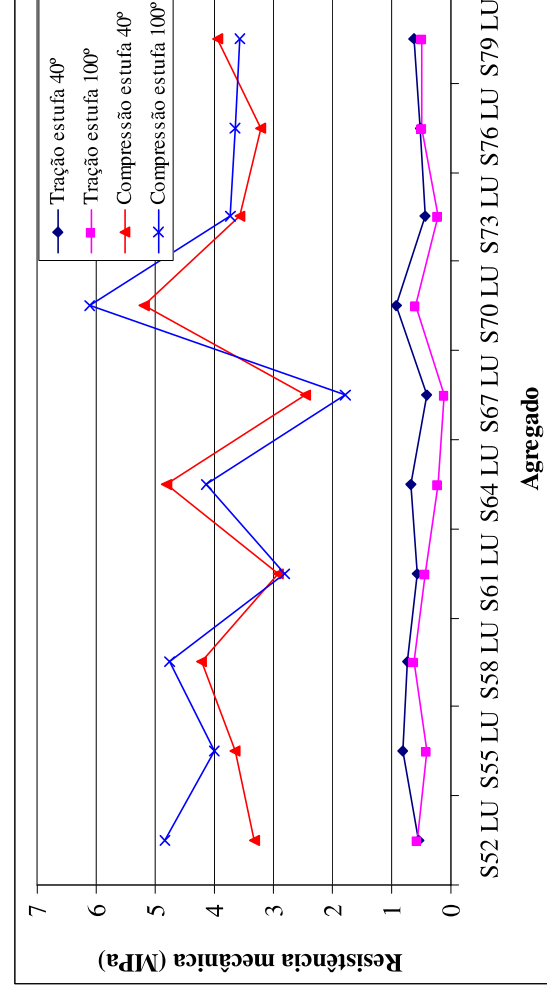


Figura 100: Resistências mecânicas das argamassas na proporção 1: 1: 8, aos 28 dias, com diferentes temperaturas de secagem em estufa.

Com a redução da variação do teor de finos < 75 μm foi possível manter a resistência à compressão no limite de amplitude de 3 MPa, definido como meta na Fase 4.

Entretanto, ao contrário do que aconteceu na fase anterior, não foi possível aqui obter boa correlação entre a resistência à compressão e o teor de finos, provavelmente pela baixa amplitude de variação desta propriedade, tornando-a de influência secundária.

De fato, assim como a consistência, a resistência à compressão mostrou aqui alguma correlação com o teor de ar aprisionado das argamassas.

Apesar da resistência à compressão ter apresentado um resultado aceitável de variabilidade, a correlação apresentada na Figura 101 mostra que o resultado poderia ter sido ainda melhor caso o teor médio de ar tivesse variado menos.

Nesta correlação, o ponto relativo à pilha P9 foi descartado por se mostrar um ponto expúrio, causado pelo seu valor extremo de absorção de água (7,8%) que fez aumentar sua resistência mecânica.

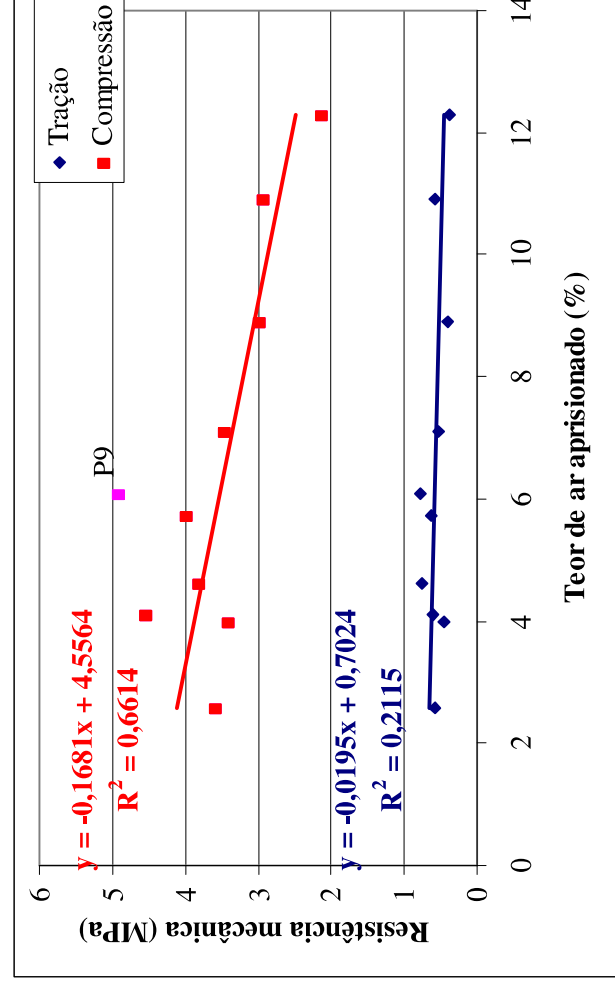


Figura 101: Relação entre a resistência mecânica aos 28 dias e o teor de ar aprisionado das argamassas.

Pelo gráfico da Figura 101, tem-se que o aumento de 1% no teor de ar seria responsável pela queda aproximada de resistência à compressão de 0,17 MPa. Ou seja, reduzir a variação do teor de ar para 7% significaria obter resistências com amplitude máxima de 2,5 MPa, aproximadamente, o que pode ser considerado um bom resultado.

Afirma-se isso porque, mesmo se todas as propriedades estivessem totalmente controladas, ainda assim haveria variações nos resultados inerentes ao ensaio, sejam elas causadas pelo processo de mistura, adensamento, cura ou rompimento dos corpos-de-prova.

De fato, isto pode ser observado no teste feito em argamassas de referência onde, mesmo tendo sido controladas todas as variáveis relativas à origem dos materiais e dosagem, os resultados de resistência à compressão de 5 moldagens de argamassas idênticas feitas com cimento CP III 32 RS, cal CH III e areia normal do IPT com distribuição granulométrica controlada apresentaram uma amplitude de variação de 1 MPa.

Quanto à resistência à tração na flexão, esta não apresentou correlação com o teor de ar como aconteceu com a resistência à compressão. Isto pode ocorrer pela presença de microfissuras nos corpos-de-prova, comuns em argamassas de agregados absorventes, que causam mais queda de resistência à tração que na compressão, e que interferem de formas diferentes nos resultados de cada argamassa.

A Figura 102 indica que a resistência à compressão pode ser mais bem correlacionada com a densidade de massa endurecida dos corpos-de-prova. Considerando-se que o ensaio de resistência à compressão exige a presença de uma prensa, o controle desta propriedade indiretamente através da densidade de massa endurecida significaria uma grande economia em investimento ou custos de controle tecnológico para uma usina.

No caso da equação mostrada na Figura 102, o aumento de 1 MPa na resistência à compressão significaria um acréscimo de, aproximadamente, 105 kg/m³ na densidade de massa endurecida. Ou seja, para uma variação de resistência à compressão de 4 MPa, como adotado pela prEN 998-1/93, teria-se uma variação de, aproximadamente, 400 kg/m³, como adotado nas classificações da MERUC. Neste trabalho, conseguiu-se nas Fases 4 e 5 amplitudes de variação de 3 MPa.

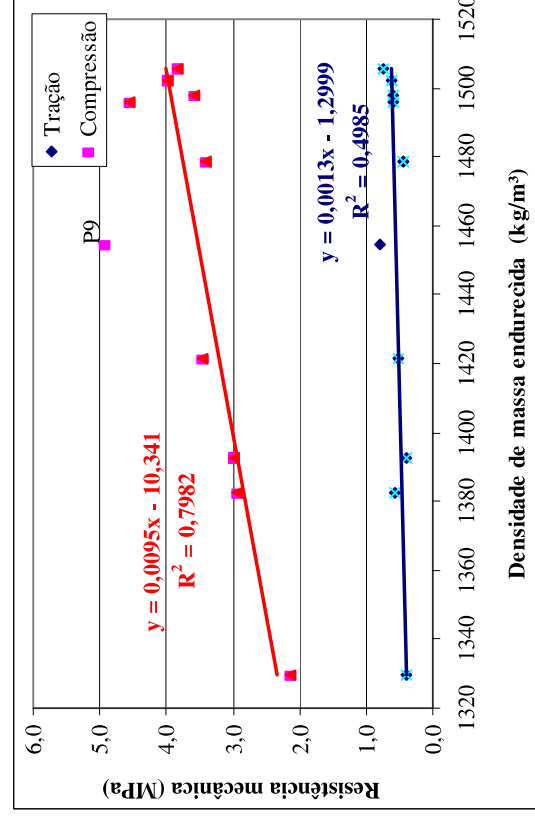


Figura 102: Correlação entre a densidade de massa endurecida e a resistência mecânica aos 28 dias das argamassas de cimento, cal e agregados reciclados lavados e homogeneizados.

6.5.3.2 Módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, foram moldados corpos-de-prova específicos, cuja cura foi diferenciada em relação à temperatura de secagem em estufa (100°C ao invés dos 40°C adotados nesta Fase 5).

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas variou em função da idade (Figura 103), diminuindo a variabilidade e o valor com o tempo. Esta variação ocorreu, principalmente, em função da secagem dos corpos-de-prova, uma vez que, com a saída da água, a densidade do material muda, diminuindo a velocidade com a qual o pulso ultrasônico atravessa o corpo-de-prova.

Para a idade de 28 dias, pode-se afirmar que a variação do módulo de elasticidade foi pequena.

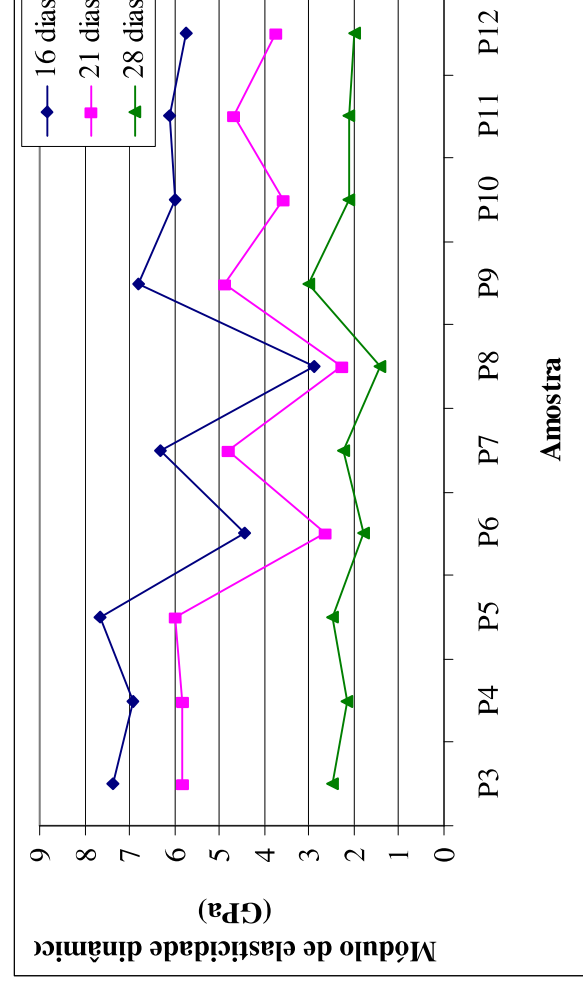


Figura 103: Variação do módulo de elasticidade dinâmico médio em função da idade, para as argamassas feitas com as 10 pilhas de agregados reciclados lavados em classificador espiral e homogeneizados.

O módulo de elasticidade dinâmico mostrou-se muito bem correlacionado com a resistência à compressão (Figura 104), o que nem sempre ocorre quando se determina o módulo de elasticidade estático por meio de extensômetros. Quanto à resistência à tração na flexão, esta não se mostrou tão bem correlacionada, o que

pode ter sido causado pela presença de fissuras na microestrutura, o que é, para agregados absorventes, um fenômeno já bem caracterizado, conforme mostrado no Capítulo 3.

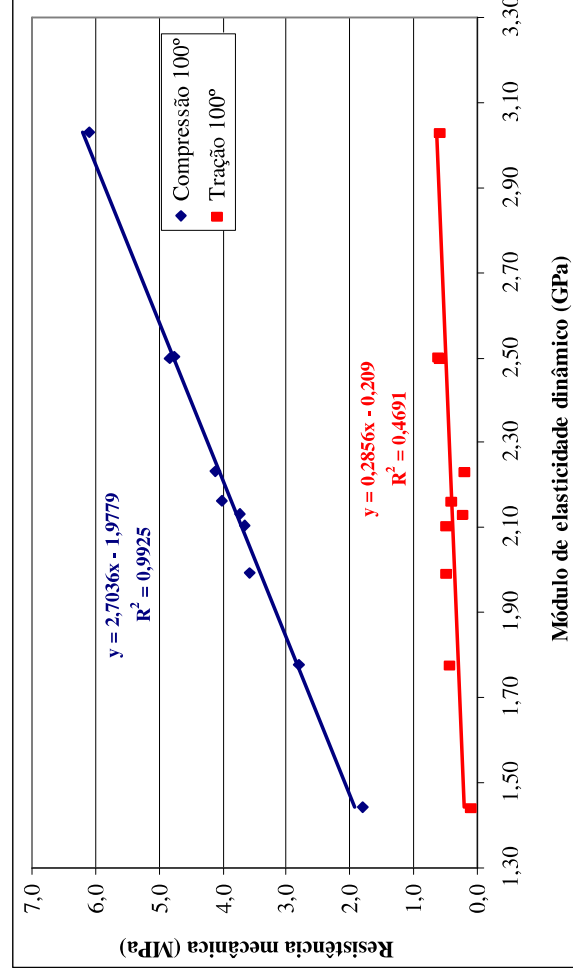


Figura 104: Correlação entre as resistência mecânicas e o módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias de idade, para as 10 argamassas feitas com agregados reciclados lavados (LU) em classificador espiral e homogeneizados.

6.5.3.3 Retração por secagem

A Figura 105 apresenta os resultados de retração por secagem das argamassas com o tempo, até a idade de 30 dias, sendo que a argamassa P7 não foi incluída porque seus corpos-de-prova foram quebrados.

Em relação aos resultados obtidos na Fase 3, as argamassas desta fase apresentaram maior valor de retração e maior variabilidade.

Entretanto, os maiores valores obtidos aqui podem ser devido à mudança dos corpos-de-prova utilizados, uma vez que na Fase 3 as dimensões eram 2,5 x 2,5 x 28,5 cm e aqui foram 4 x 4 x 16 cm.

Quanto à variabilidade, apenas uma argamassa apresentou um resultado de retração superior a 4000×10^{-6} mm/mm, fazendo com que a amplitude de variação

chegasse a 1500×10^{-6} , sendo que a análise de retração dos corpos-de-prova desta argamassa mostrou que os resultados estavam bem dispersos (entre 2000 e 6000×10^{-6} mm/mm).

Assim sendo, desconsiderando-se esta argamassa, tem-se uma variação de apenas 1000×10^{-6} mm/mm, apenas conseguida na Fase 3 com agregados lavados em laboratório, podendo ser considerado então um ótimo resultado.

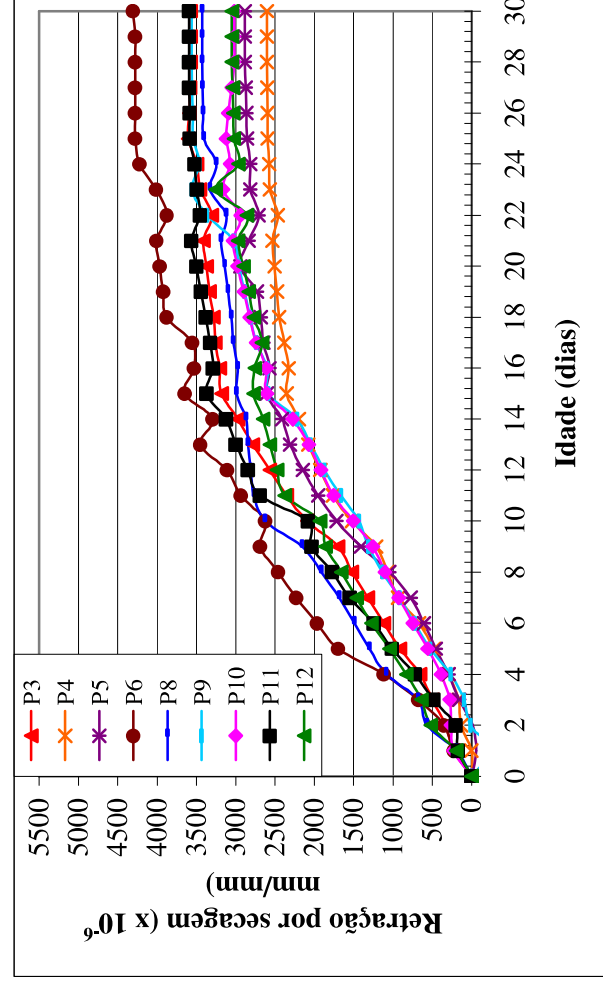


Figura 105: Retração por secagem das argamassas com o tempo, para agregados reciclados lavados em classificador espiral e homogeneizados.

A Figura 106 mostra que a densidade de massa endurecida também poder um parâmetro indireto e adicional de controle de retração das argamassas, e indicativo, por exemplo, das necessidades de correção do traço para controle de consumo de água e de total de finos.

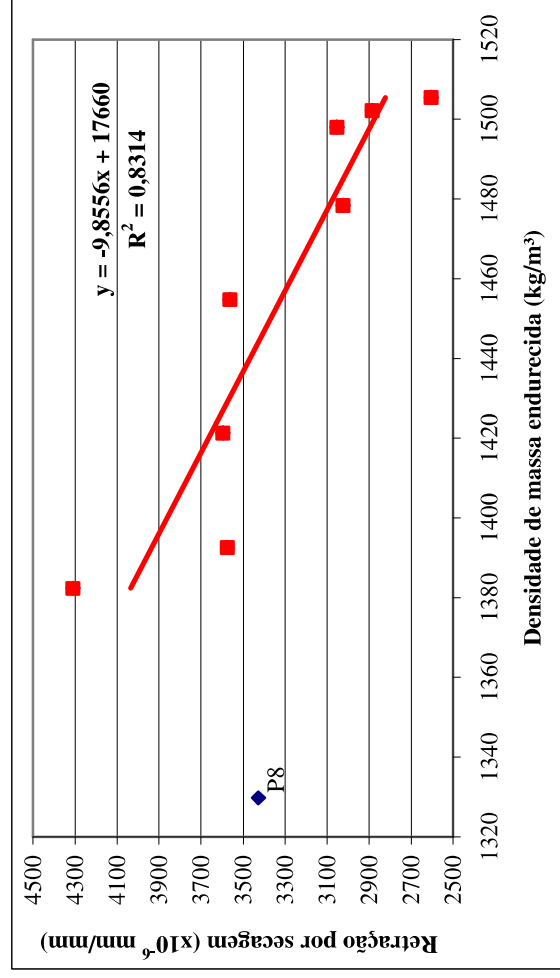


Figura 106: Correlação entre a retração por secagem aos 30 dias e a densidade de massa endurecida.

6.5.3.4 Absorção capilar

Ao contrário do que aconteceu na Fase 1, não foi possível aqui observar uma correlação grande entre a absorção capilar e o teor de finos < 75 μm , absorção de água do agregado ou a relação água/cimento efetiva. Para todas estas propriedades, o grau de correlação ficou em torno de 0,45.

Isto porque estas propriedades apresentaram uma grande redução de variabilidade nesta fase, fazendo com que a importância de cada uma diminuísse.

Comparando com os resultados obtidos na Fase 3, pode-se afirmar que a variação diminuiu significativamente, atingindo resultados mais satisfatórios. Mas, com relação aos limites estabelecidos pela NBR 13281/05, todas as argamassas apresentaram um alto coeficiente de absorção capilar, classificadas como C6.

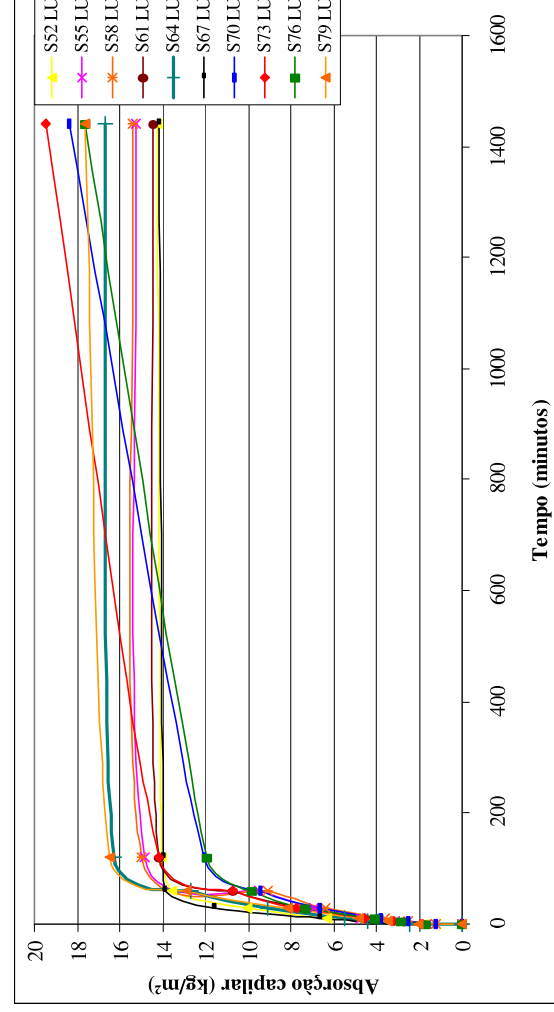


Figura 107: Variação da absorção capilar das argamassas feitas com agregados lavados em classificador espiral e homogeneizados, com o tempo.

6.5.3.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os resultados de porosimetria (Anexo F8) indicam que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estão sendo influenciados, principalmente, pelo diâmetro médio dos poros, e não pela porosidade total (Figura 108 e Figura 109).

De fato, MEHTA; MONTEIRO (1994) afirmam que o diâmetro dos poros é uma propriedade mais relevante na resistência mecânica de concretos do que a porosidade total.

Na Figura 110 observa-se que as argamassas com menores resistências (S61 LU e S67 LU) são aquelas com menor quantidade de poros entre as faixas de 3 e 100 nm de diâmetro dos poros e maior quantidade de poros acima deste diâmetro. O inverso ocorre para as argamassas S64 LU e S70 LU que possuem as maiores resistências à compressão.

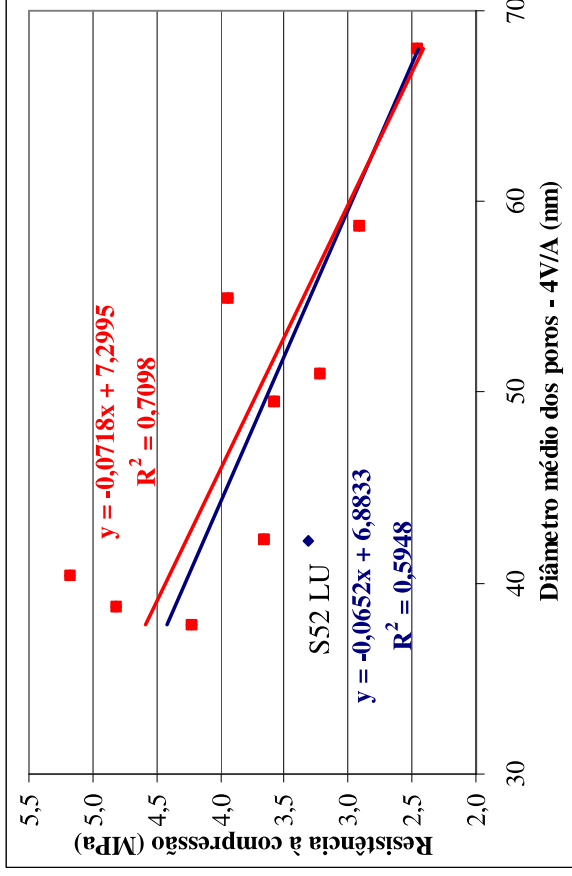


Figura 108: Correlação entre a resistência à compressão e o diâmetro médio dos poros dos corpos-de-prova de argamassa com areias recicladas lavadas (Fase 5).

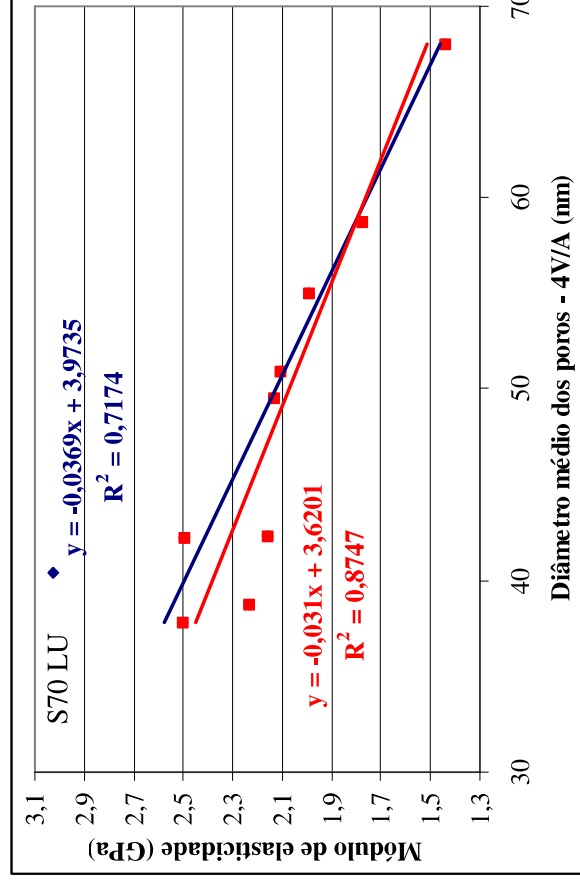


Figura 109: Correlação entre o módulo de elasticidade e o diâmetro médio dos poros dos corpos-de-prova de argamassa com areias recicladas lavadas (Fase 5).

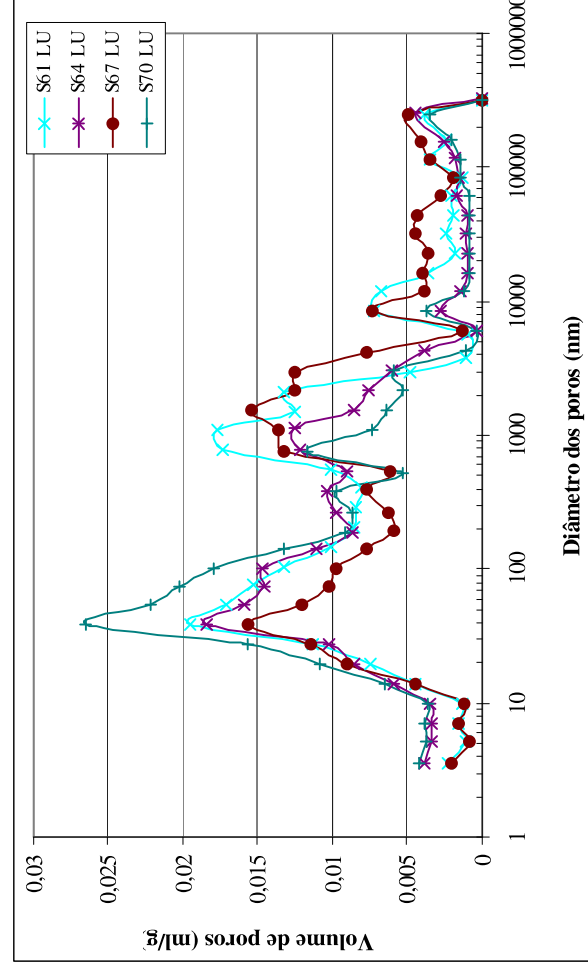


Figura 110: Volume de poros das argamassas com maiores resistências à compressão (S64 LU e S70 LU) e também menores resistências (S61 LU e S67 LU), em função do diâmetro dos poros.

Além disso, a correlação entre a resistência à compressão e o diâmetro médio dos poros é um pouco melhor do que aquela apresentada na Figura 101 para a resistência à compressão e o teor de ar aprisionado, mesmo tendo as argamassas produzidas a mesma relação a/c total, o que apenas comprova mais uma vez a maior importância do diâmetro dos poros do que seu volume total.

Com esta análise de porosidade, mostra-se que, apesar de ter sido utilizada areia reciclada produzida predominantemente de RCC de natureza de cerâmica vermelha, a distribuição do tamanho dos poros continua sendo a principal propriedade controladora da resistência à compressão.

6.5.4 Avaliação de desempenho dos revestimentos produzidos em Socorro/SP com areias recicladas obtidas através da lavagem em classificador espiral e com formação de pilhas de homogeneização

A Tabela 93 apresenta um resumo dos resultados de caracterização das argamassas de revestimento aplicadas em Socorro/SP na Fase 5.

Com exceção da relação água/cimento total da argamassa produzida com a amostra P4, as demais propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido não apresentaram variações significativas.

Apenas os resultados da argamassa de cimento, cal e areia de rio (REF), foram bem superiores, como decorrência do seu baixo consumo de água.

Tabela 93: Caracterização dos agregados reciclados e das argamassas utilizadas na produção de revestimentos na Fase 5.

Amostra	Total de finos < 75 µm (%)	Dosagem (massa úmida)	Rel. a/c total (kg/kg)	Densidade de massa (kg/m ³)	Tração na flexão (MPa)	Compressão (MPa)	Fissuração (cm/m ²)
P3	22,0	1:1:8,9	2,9	-	-	-	18
P4	22,2	1:1:8,7	2,5	1910	0,66	2,72	23
P5	22,5	1:1:9,1	3,1	-	-	-	19
P6	21,5	1:1:8,9	2,9	-	-	-	10
P8	21,1	1:1:9,0	3,1	1950	0,65	2,57	0
P9	21,7	1:1:8,9	2,9	1910	0,49	2,10	9
P10	21,6	1:1:9,2	3,2	-	-	-	0
P11	22,3	1:1:9,1	3,2	-	-	-	80
P12	21,4	1:1:9,2	2,9	-	-	-	0
REF	-	1:1:8,7	1,9	2040	1,25	4,09	71

A Figura 111 apresenta os revestimentos produzidos em Socorro durante a Fase 5, sendo que os painéis 1 a 4 não foram caracterizados. Os painéis 2 e 4, de cor mais clara, são feitos apenas de cal CH III e areia reciclada lavada, sem cimento. Os painéis da parte inferior é que fazem parte da pesquisa.

Pela Figura 111 percebe-se que os revestimentos feitos com a areia homogeneizada por formação de pilhas (P3 a P12) apresentam uma uniformidade de cor bem superior ao dos revestimentos produzidos na Fase 4 (item 6.4.4), o que é um indicio de melhoria no padrão do agregado, principalmente para as propriedades de absorção de água e teor de finos < 75 µm.

Os testes de aderência ao substrato nos painéis P3 e P7 tiveram como resultados médios os valores de 0,30 e 0,31 MPa, respectivamente, na área sem chapisco, mostrando boa aderência e baixa variabilidade.

Os revestimentos apresentaram boa resistência superficial e baixo nível de fissuração, sendo que a ocorrência dessa anomalia pode ser dividida em três tipos.



Figura 111: Vista completa da parede externa de 40 m² executada utilizando os agregados reciclados lavados em classificador espiral e homogeneizados.

Um dos tipos de fissuração caracteriza-se por ser fissuras de retração por secagem do revestimento de argamassa, causada principalmente pelo teor total de finos < 75 µm (Figura 112). São de espessura bem fina (< 0,4 mm), em pouca quantidade, não comprometendo a aderência ou o aspecto visual do revestimento.

De fato, como mostrado na Figura 113, a fissuração tende a diminuir com o aumento da porosidade já que, no caso desta pesquisa, onde a relação a/c total foi mantida constante e o teor total de finos foi mantido em intervalo controlado, o aumento da porosidade total da argamassa deve ser provocado, principalmente, pela porosidade das areias recicladas.

Não se deve deixar de considerar que uma redução no teor de finos aumenta a porosidade total e o diâmetro dos poros, que é considerada a propriedade mais importante para o controle de fissuras. Nesta pesquisa a variação do diâmetro médio dos poros foi pequena, se enquadrando no intervalo entre 37 nm e 68 nm que é característico de poros capilares, muito nocivos para a retração segundo MONTEIRO (1994), e isto explica a elevada retração linear das argamassas.

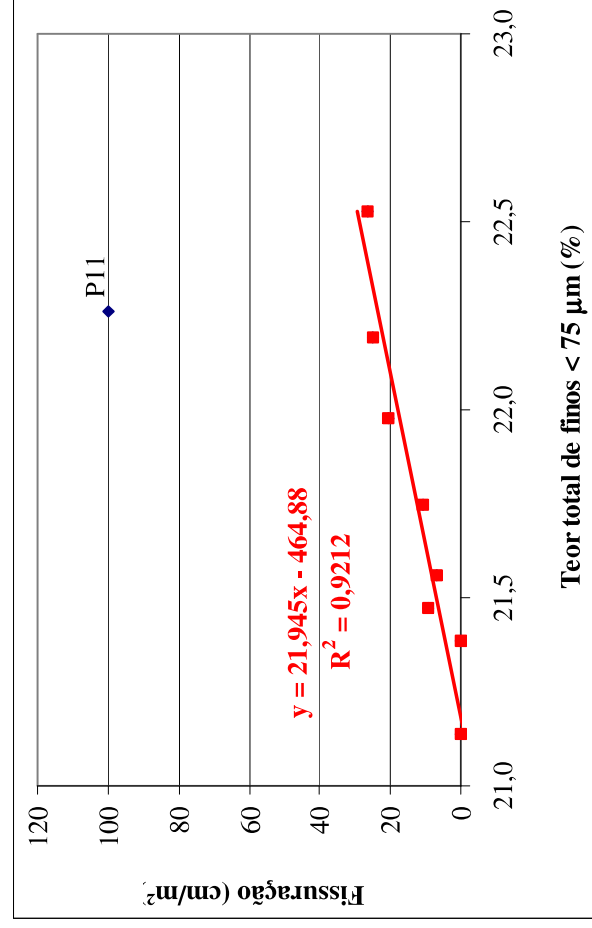


Figura 112: Correlação entre a fissuração visível encontrada nos revestimentos e o teor total de finos < 75 µm do agregado reciclado lavado e homogeneizado.

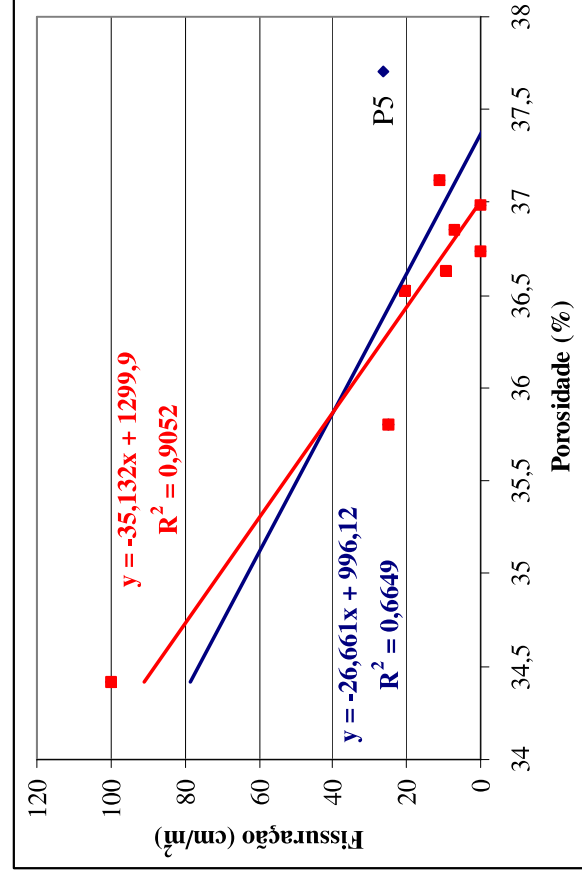


Figura 113: Correlação entre o grau de fissuração dos revestimentos e a porosidade total medida por porosimetria de mercúrio, com correlação de 0,905 quando se desconsidera o ponto expúrio P5.

O segundo tipo de fissuras foram também de retração por secagem, porém verticais e horizontais (Figura 114), contornando a alvenaria exatamente nas juntas de assentamento. Estas fissuras surgiram, principalmente, no revestimento feito com a pilha P11 e na de cimento, cal e areia. Estas fissuras tiveram como causa principal a argamassa de assentamento dos blocos, que foi feita com areia reciclada não lavada que, certamente, aumentou a velocidade e o volume de perda de água da argamassa de revestimento. Por isso o revestimento P11 apresentou um grau de fissuração bem superior aos demais que, aliás, todas as fissuras presentes neste painel ocorreram em cima da argamassa de assentamento.



(a)

(b)

Figura 114: Revestimentos de argamassa com areias recicladas lavadas e homogeneizadas. (a) Presença de microfissuras e de fissuras verticais e horizontais coincidentes com a junta de assentamento, visíveis com umedecimento e logo após a molhagem. (b) Revestimento de argamassa após 1 minuto da molhagem, sem a presença de microfissuras.

O terceiro tipo de fissuras que surgiram foram as microfissuras, superficiais e mapeadas (Figura 114), perceptíveis somente durante a molhagem do revestimento e por um curto intervalo de tempo.

Logo após o início da molhagem, até um tempo aproximado de 30 segundos, a água penetra mais rapidamente no revestimento por suas microfissuras e pela argamassa de assentamento, tornando-as mais nítidas. Após este tempo, todo o revestimento fica encharcado de forma que não é mais possível visualizá-las.

Sabe-se que revestimentos de argamassa, mesmo feitos com areia natural, estão susceptíveis à fissuração, seja pela presença de excesso de finos ou de água, condições climáticas, substrato, forma de execução e, até mesmo, do cimento. Isso faz com que a fissuração seja uma das falhas de desempenho mais comuns de revestimentos.

Apesar disso, não existem especificações ou normas que definam o que é um bom desempenho do revestimento quanto ao surgimento de fissuras, seja para revestimento interno ou externo.

Em termos visuais, dois parâmetros que influenciam a qualidade de um revestimento quanto à fissuração são o desenvolvimento linear de fissuras por m², aqui chamado de grau de fissuração, e a abertura das fissuras. A presença de um baixo grau de fissuração com fissuras de pequena abertura não agride o aspecto visual do revestimento sendo, portanto, para este parâmetro, aceitável.

A abertura da fissura influencia também a aderência do revestimento ao substrato, o desempenho da pintura e a estanqueidade. Geralmente, a região ao redor de uma fissura de grande abertura deve ter sua aderência comprometida e essa fissura dificulta ou impede seu total cobrimento pela pintura e é um caminho fácil para penetração de água de chuva.

Considera-se, a partir do critério visual, que os revestimentos aplicados nesta Fase 5 em Socorro/SP apresentaram um bom desempenho quanto à fissuração. O grau de fissuração obtido foi sempre abaixo de 30 cm/m² e este pode ser considerado aceitável. Além disso, as fissuras que surgiram nos revestimentos, foram de abertura menor que 0,4 mm, são quase imperceptíveis ao olho nu e, provavelmente, não causariam problemas para a pintura.

Quanto aos revestimentos aplicados em obra de asilo na cidade de Socorro/SP, com as amostras da Fase 5, os resultados podem ser considerados insatisfatórios devido às fissuras generalizadas que ocorreram.

Observou-se, porém, que o comportamento dos revestimentos quanto à fissuração nesta obra foi afetado, principalmente, por duas variáveis: substrato e espessura dos revestimentos.

De fato, como resumido na Tabela 94, os revestimentos aplicados sobre substrato de tijolos cerâmicos maciços com espessura superior a 3 cm foram os que apresentaram a maior incidência de fissuras. Quando a espessura não ultrapassou 2 cm ou o substrato era de tijolos cerâmicos furados (seja na parede ou no teto, como na Figura 115), o desempenho foi satisfatório. A aplicação da argamassa em duas etapas, em locais onde a espessura era elevada (< 3 cm), ajudou a reduzir a fissuração, mas ainda assim surgiram fissuras de grande abertura nesses revestimentos.

Tabela 94: Resumo do desempenho dos revestimentos aplicados em obra de asilo público na cidade de Socorr/SP.

Substrato	Espessura	Desempenho
Tijolo cerâmico maciço	> 3 cm	Insatisfatório
	< 2 cm	Satisfatório
Tijolo cerâmico furado	> 3 cm, em 2 camadas	Insatisfatório
	< 2 cm	Satisfatório, sem fissuras



Figura 115: Revestimento de argamassa aplicado no teto de asilo da cidade de Socorro/SP, com areia reciclada lavada da Fase 5 desta pesquisa.

6.5.5 Análise estatística dos resultados da Fase 5 e proposição de parâmetros para o controle de qualidade

O objetivo desta análise final é verificar se estes lotes poderiam ser enquadrados em uma produção sob controle estatístico de processo, bem como fazer uma análise da qualidade das operações de ensaio.

A Tabela 95 apresenta uma análise da variação dos resultados de caracterização das 30 amostras de areia reciclada da Fase 5, onde foi calculado também o desvio-padrão relativo à produção e ao ensaio.

De acordo com HELENE; TERZIAN (1993), ensaios de resistência à compressão em concretos com misturas experimentais em laboratório são considerados deficientes quando o coeficiente de variação das operações de ensaio são maiores que 4%.

Considerando este critério não só para a resistência à compressão, mas também para os demais ensaios de agregados e argamassas no estado fresco e endurecido mostrados na Tabela 95, tem-se que apenas os ensaios de densidade de massa aparente e de massa específica do agregado, a consistência e a densidade de massa fresca e endurecida das argamassas se enquadram como operações de ensaio eficientes.

No caso dos ensaios de absorção de água e teor de finos < 75 µm do agregado, apesar deles serem classificados como deficientes por este critério, suas respectivas normas possuem procedimentos de verificação da validade do ensaio. Pela NBR 7219/87, a diferença de teor de finos entre as duas repetições não pode ser superior a 1% e, pela NBR 9777/87, a diferença entre a absorção das duas repetições não pode ser superior a 0,5%. Considerando que estes parâmetros foram respeitados para a maioria das amostras, pode-se considerar que estes ensaios são aceitáveis.

Tabela 95: Resultados de caracterização das 30 amostras de argamassas e agregado reciclados da Fase 5.

	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Densidade de massa específica (kg/m ³)	Absorção de água (%)	Teor de finos < 75 µm (%)	Consistência (mm)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Tração na flexão (MPa)	Compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade de massa endurecida (kg/m ³)	Abs. capilar (kg/m ² em 24 h)
Média	1188	2629	5,9	2,3	318	1850	0,6	4	2	1446	16
DP total	35,3	17,1	0,8	0,59	17,8	61,6	0,2	0,8	0,4	61,5	1,9
DP ensaio	21,0	9,8	0,4	0,15	5,0	8,9	0,05	0,31	0,32	48,3	1,2
DP produção	28,4	14,0	0,7	0,57	17,1	61,0	0,15	0,76	0,29	38,1	1,5
CV total (%)	3,0	0,6	14	26	5,6	3,3	27	23	20	4	12
CV ensaio (%)	1,8	0,4	6,1	6,7	1,6	0,5	9,4	8,6	14,7	3,3	7,2

DP = desvio-padrão ; CV = coeficiente de variação

Sendo assim, apenas os ensaios no estado endurecido de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção capilar podem ser considerados ineficientes por este critério.

Comparando com os resultados da Fase 4, pode-se afirmar que as propriedades de densidade de massa aparente, absorção de água, teor de finos < 75 µm e consistência apresentaram redução na variação dos resultados, enquanto que as resistências mecânicas tiveram sua variação aumentada.

Em relação à obtenção de um processo sob controle estatístico, tem-se, mais uma vez, que a maioria das propriedades medidas respeitaram os limites superior e inferior para o gráfico de amplitude, mas extrapolaram estes limites para o gráfico de média, significando que ainda não foi possível obter um processo sob controle estatístico quanto à média (Figura 116 e Figura 117).

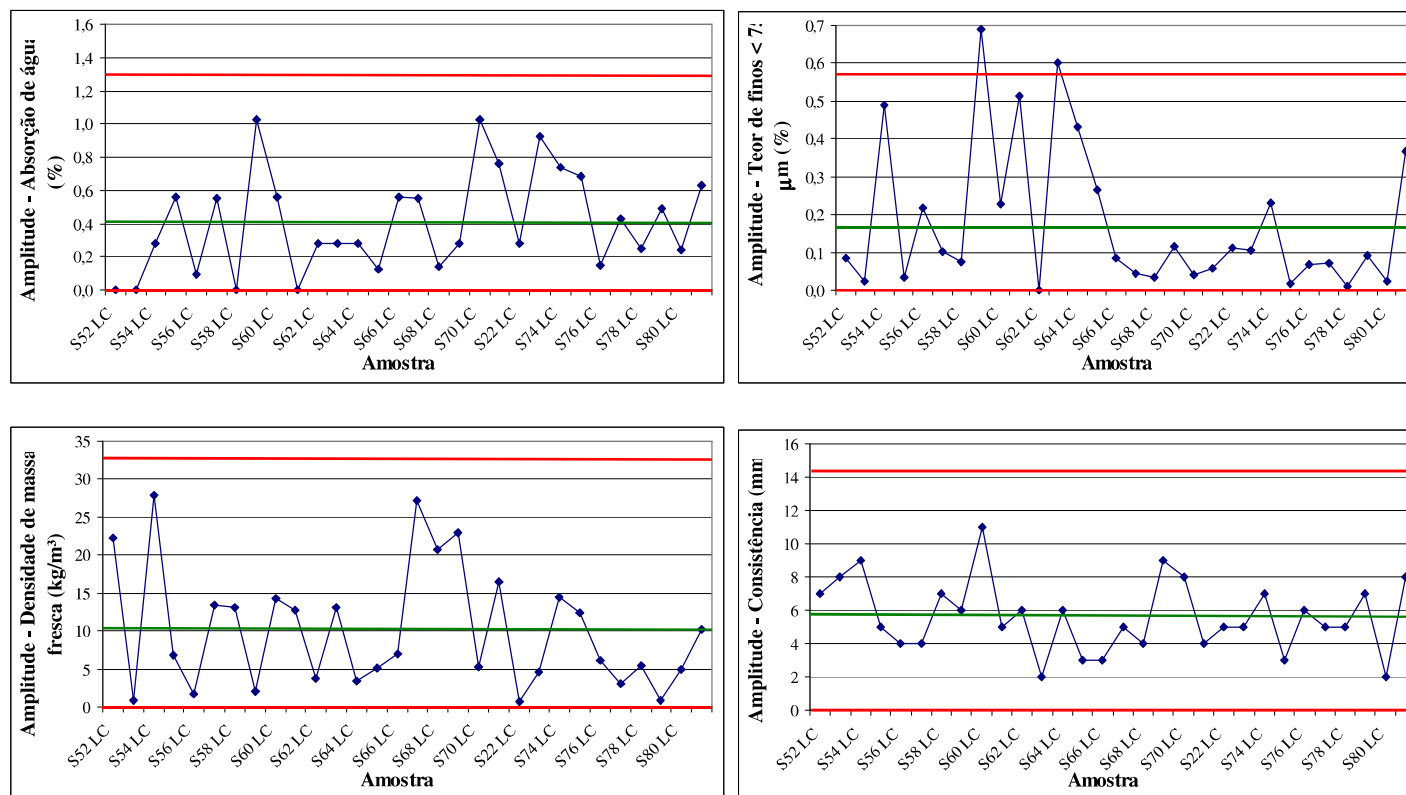


Figura 116: Gráficos de controle da amplitude, com 2 pontos excedendo os limites de controle para o teor de finos < 75 μm.

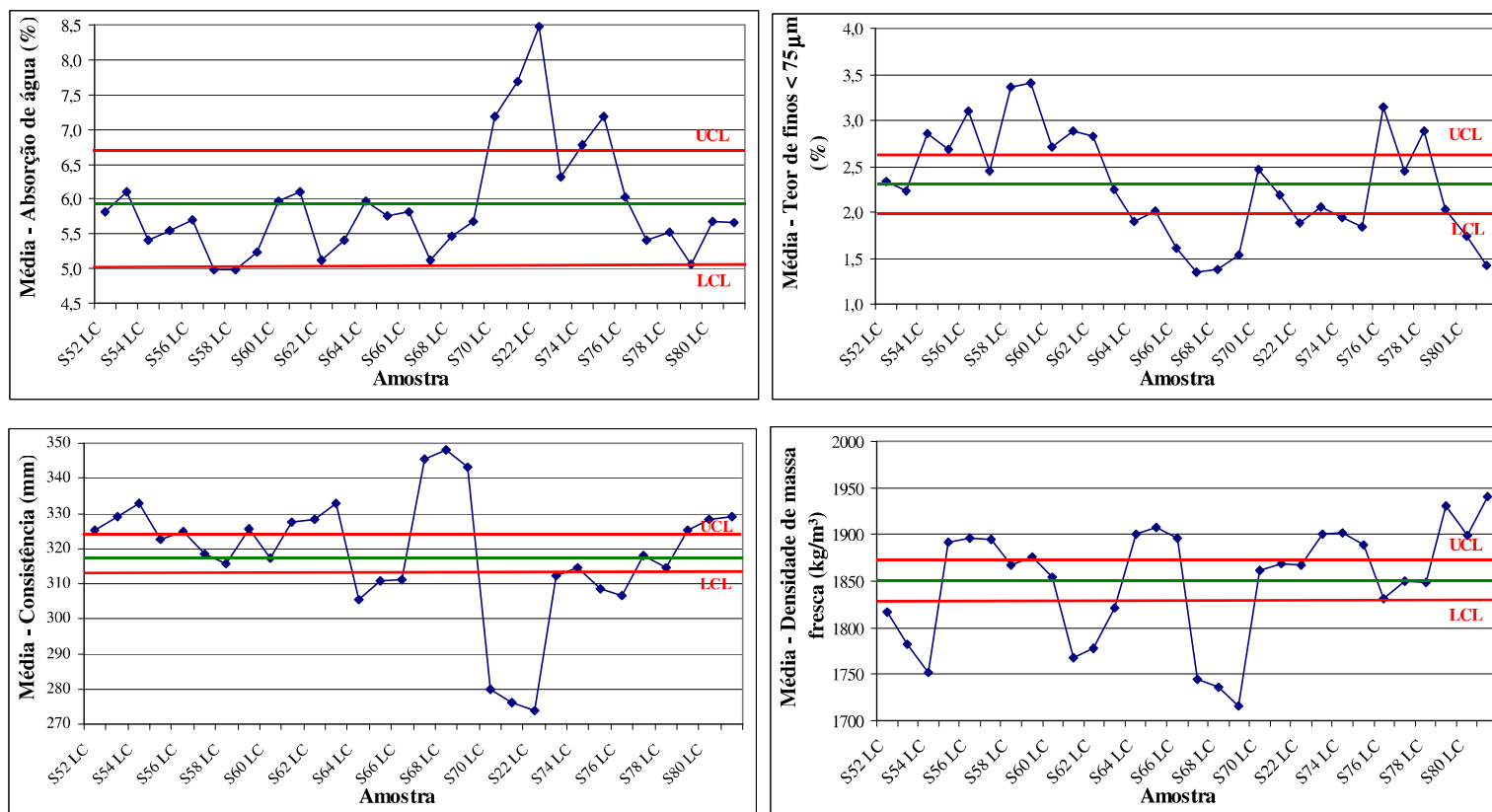


Figura 117: Gráficos de controle da média, com diversos pontos excedendo os limites de controle para todas as propriedades.

De fato, os resultados mostram que, mesmo com a redução de variabilidade obtida com as técnicas utilizadas, atingir um nível de qualidade 3σ deve ser possível se o RCC passar por um controle rigoroso de sua composição, o que pode inviabilizar sua reciclagem para o fim aqui pretendido, já que o custo de produção muito elevado da areia pode não incentivar o desenvolvimento de um nicho de mercado muito atraente.

Mas, o programa realizado e a análise dos resultados permite propor quais propriedades devem ser controladas de forma prioritária durante o processo de produção de areia reciclada e de argamassas em usinas, bem como a amplitude máxima de variação que pode ser esperada (Tabela 96). A Tabela 97 resume a importância do controle de cada propriedade proposta e a forma como foi definido cada intervalo de variação adotado.

A absorção de água do agregado e seu teor de finos $< 75 \mu\text{m}$ são considerados ensaios fundamentais no controle. O módulo de finura não é considerado fundamental e por isso não foi incluído na Tabela 96, mas auxilia na manutenção do moinho e da peneira vibratória. Caso seja adotado no controle, sua amplitude de variação não deve ser superior a 0,4.

O teor de sulfatos e sais solúveis, apesar de não ter sido objetivo deste trabalho estudá-lo, foi avaliado por AGUIAR (2004) com as mesmas amostras usadas aqui e é considerado de grande importância no controle devido às suas consequências nas argamassas. De forma alternativa e até mais eficiente pode-se controlar efeitos desses sais por análise de SO_3 total solúvel em ácido e ainda por ensaios de suscetibilidade à eflorescências.

Em seu trabalho, AGUIAR (2004) conclui que é possível aceitar os limites preconizados pelo IGS (item 2.10.6) ou da norma DIN 4226-100/02 (item 2.10.4) que se refere a agregados reciclados para argamassas. O valor limite estipulado pelo IGS na classificação de risco pequeno (0,077%) é próximo ao estipulado pela DIN 4226-100/02 (600 mg/L), sendo adotado este valor como limite máximo.

Entretanto, considera-se pouco provável, no processo proposto, a presença de sais e sulfatos solúveis devido à lavagem do agregado.

Tabela 96: Propriedades a serem controladas e limites de especificação.

Propriedade	Amplitude de variação	Limites de especificação*
Absorção de água do agregado (%)	3,0	-
Teor de finos < 75 µm (%)	3,0	< 5,0
SO ₄ solúvel	-	< 0,077%
SO ₃ total	-	< 1%
Consistência (mm)	50	280 a 330
Densidade de massa fresca (kg/m ³)	150	> 1700
Resistência à tração na flexão (MPa)	1,0	> 0,5
Densidade de massa endurecida (kg/m ³)	200	-

* Para revestimento interno

Considera-se necessária a caracterização da densidade de massa aparente dos agregados apenas se houver a necessidade de transformação da proporção de mistura de massa para volume e vice-versa, e para informar ao consumidor em cálculos de consumo de materiais, admitindo-se controladas as propriedades de absorção de água do agregado, teor de finos < 75 µm e módulo de finura.

No caso do fornecimento de misturas semi-prontas (cal e areia reciclada lavada), é necessário fazer o controle de umidade da areia antes da mistura com a cal, pois, apesar do classificador espiral produzir uma areia lavada com um intervalo de variação de umidade bem estreito, a formação da pilha de homogeneização exposta ao tempo fará com que a umidade varie largamente.

Para a resistência mecânica, considera-se suficiente controlar apenas a resistência à tração na flexão. Não há a necessidade de controlar a resistência à compressão, principalmente se estiver sendo controlada a densidade de massa endurecida.

As propriedades de desempenho dos revestimentos, como o grau de fissuração e a resistência de aderência à tração, não foram consideradas no controle por se tratar aqui de argamassas semi-prontas, sem a adição de cimento, e por serem propriedades típicas de controle de execução, já que estarão afetadas por materiais e mão-de-obra peculiares ao processo construtivo de cada obra.

Assim, tais ensaios podem e devem ser realizados com o intuito de fornecer ao consumidor uma estimativa de dosagem do cimento para atingir os limites de norma

que, no caso da resistência de aderência para paredes internas é de, no mínimo, 0,20 MPa. Além disso, a simples visita regular às obras executadas com areia reciclada por um funcionário treinado da usina poderá indicar a necessidade de ajustes no processo para controle de desempenho dos revestimentos.

Entretanto, como a fissuração é um problema com diversas origens e comum nos revestimentos de argamassa, considerou-se importante criar um diagrama tipo espinha-de-peixe para auxiliar na verificação da causa de seu surgimento (Figura 119).

Voltando aos limites de variação propostos na Tabela 96, eles foram definidos, principalmente, em função dos resultados obtidos na pesquisa, mas também considerando os limites definidos por normas nacionais e estrangeiras, analisados no Capítulo 3.

Quando se diz que os limites de variação foram definidos em função dos resultados obtidos, levou-se em consideração não somente a influência da amplitude de variação nas propriedades das argamassas (como mostrado em diversos gráficos de correlação entre propriedades), mas também o nível de controle que se conseguiu obter com as técnicas utilizadas e o estágio inicial do processo de reciclagem desenvolvido.

Assim, por exemplo, no caso da absorção de água dos agregados, considera-se que a amplitude de variação ideal seria de 2% para diminuir a influência na consistência. O mínimo obtido aqui foi de 2,4%, mas foi proposto o intervalo de 3%, considerando que o processo de reciclagem definido é novo e algumas usinas podem sentir uma certa dificuldade inicial em atingir esta meta. Mas, também, é possível que se chegue no intervalo de 2% com a formação de pilhas de maiores volumes.

O mesmo ocorreu para a densidade de massa fresca da argamassa. Considera-se como ideal o intervalo de, no máximo, 140 kg/m³. Entretanto, foi proposto o intervalo de 200 kg/m³ devido às razões descritas anteriormente.

Tabela 97: Importância do controle de cada propriedade e método de definição de cada intervalo de variação adotado na Tabela 96.

Propriedade	Importância	Método de definição do intervalo
Absorção de água do agregado	Influência na densidade de massa aparente do agregado, consumo de água, consistência e resistência mecânica das argamassas	Em função dos resultados obtidos nas Fases 4 e 5 (valor mínimo de variação obtido e correlação com a consistência)
Teor de finos < 75 µm	Influência no consumo de água, resistência mecânica das argamassas e fissuração dos revestimentos	Em função dos resultados obtidos nas Fases 4 e 5 (valor mínimo de variação obtido e correlação com a resistência à compressão)
Módulo de finura	Influência na curva granulométrica, auxílio no plano de manutenção do moinho e da peneira	Em função dos resultados obtidos nas Fases 4 e 5
Teor de sais solúveis	Causador de patologias nos revestimentos	IGS, AGUIAR (2004)
Consistência	Controle da trabalhabilidade das argamassas	Experimentalmente, através da análise de trabalhabilidade
Densidade de massa fresca	Determinação indireta do teor de ar aprisionado, de influência na consistência e nas propriedades do estado endurecido, necessário para cálculo do consumo de cimento	Em função da amplitude aceita para argamassas industrializadas do mercado e dos resultados obtidos nesta pesquisa, principalmente quanto ao rendimento.
Resistência à tração e densidade de massa endurecida	Influência no desempenho dos revestimentos	Em função dos limites estipulados pela NBR, BSI e MERUC, e dos resultados obtidos em MIRANDA (2000) e nesta pesquisa.

Através da metodologia apresentada no item 5.10, foi calculado nível de qualidade atingido em função dos limites de especificação adotados para cada propriedade definida na Tabela 96, considerando que os resultados estavam centrados no valor médio dos intervalos propostos. Observa-se pela Tabela 98 que os resultados estão bem aquém do nível de qualidade 3σ .

Quanto ao controle de aceitação, entre os planos de amostragem e procedimento na inspeção por variáveis definidos pela NBR 5429/85, escolheu-se aquele com nível de inspeção especial SI, de variabilidade desconhecida, método do

desvio-padrão, para um lote de 2 a 500 m³ de material. Isto porque este plano foi aquele que menos chance tem de inviabilizar economicamente o controle de qualidade e permite a formação de lotes de tamanhos compatíveis com as usinas já instaladas no país.

Tabela 98: Nível de qualidade atingido para os limites de especificação adotados na Fase 5.

Propriedade	Metade do intervalo proposto	R/d ₂	Qualidade (σ)
Absorção de água dos agregados (%)	1,5	1,4	1,06
Teor de finos < 75 μm (%)	1,5	1,0	1,46
Consistência (mm)	25	31,3	0,80
Densidade de massa fresca (kg/m ³)	100	113	0,89
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,5	0,24	2,10

Com o plano acima e para um nível de qualidade aceitável (NQA) de 4% (ou seja, máxima porcentagem defeituosa que, para fins de inspeção por amostragem pode ser considerada satisfatória como média de um processo) no regime de inspeção normal, tem-se um tamanho de amostra de 3 unidades e uma porcentagem defeituosa máxima admissível (M) de 18,86%.

Calculando-se os índices de qualidade inferior e superior (Qi e Qs) e utilizando-se as tabelas 27 a 34 da NBR 5429/85, tem-se a porcentagem defeituosa estimada do lote (pi e ps). Para um limite de especificação bilateral, se pi ou ps for maior que M ou se Qi ou Qs forem negativos, o lote será rejeitado.

Sendo assim, para os limites de variação descritos na Tabela 96 e o plano definido acima, tem-se na Tabela 99 os resultados de controle de aceitação apara a Pilha 1.

Tabela 99: Controle de aceitação e rejeição da Pilha 1 de areia lavada e homogeneizada da Fase 5.

	Absorção de água (%)	Teor de finos < 75 μm (%)	Consistência (mm)	Densidade de massa fresca (kg/m^3)	Tração (MPa)
P_s	0,0	0,0	41,4	0,0	0,0
P_i	0,00	0,0	0,0	0,0	Q _i neg.
M	18,86	18,86	18,86	18,86	18,86
A ou R?	Aceita	Aceita	Rejeita	Aceita	Rejeita

Ou seja, com o plano utilizado, a Pilha 1 seria rejeitada para 2 propriedades: consistência e resistência à tração na flexão.

Fazendo a mesma análise para as demais pilhas de areia, tem-se que todas elas apresentaram, ao menos, uma propriedade rejeitada.

Entre as propriedades da Tabela 99, a densidade de massa fresca foi a que rejeitou o maior número de pilhas (7), seguida da resistência à tração (5) e da consistência (4). A absorção de água apenas uma e o teor de finos aprovou todas.

Alterar o plano de inspeção para um outro de NQA maior não é interessante, pois com isso aceitaria-se um grande número de amostras defeituosas.

De acordo com a NBR 5429/85, seria necessário passar para o plano de inspeção severa, uma vez que mais de 2 lotes em 5 consecutivos foram rejeitados na inspeção original, e somente voltar para o plano de inspeção normal quando 5 lotes consecutivos forem aprovados na inspeção original.

Caberia então uma re-análise dos limites de especificação estipulados para cada propriedade:

- a amplitude de variação do teor de finos < 75 μm é considerado bem estipulado, possível de ser atingido em campo sem grandes dificuldades com o processo adotado e não apresenta problemas no controle de aceitação;
- a amplitude de variação estipulada para a absorção de água da areia reciclada também é passível de ser conseguida em campo e só reprovou uma das 10 pilhas formadas. Entretanto, esta amplitude pode

estar afetando a consistência e a densidade de massa fresca das argamassas, devendo ser buscado um método para reduzi-la em campo;

- a amplitude de variação estipulada para a consistência também não deve ser alterada, por poder influenciar a trabalhabilidade da argamassa. O mesmo ocorre para a densidade de massa fresca, por afetar o rendimento. Entretanto, deve-se reduzir ainda mais a variação de resultados;
- a resistência à tração pode ser ajustada pela simples mudança na dosagem, não sendo, portanto, considerada uma propriedade preocupante.

Assim, considera-se como alternativa melhorar ainda mais o processo visando uma maior homogeneidade da matéria-prima. Como alternativas para isso tem-se a aplicação conjunta da classificação visual e a formação de pilhas de homogeneização para um volume maior do que o utilizado nesta pesquisa.

6.5.6 Resumo da análise dos resultados obtidos na Fase 5

O objetivo desta fase foi verificar a eficácia da lavagem da areia reciclada em classificador espiral e da formação de pilhas de homogeneização na redução da variabilidade das propriedades dos agregados e argamassas. Através da análise dos resultados dos ensaios, pode-se afirmar que:

- a lavagem da areia reciclada em classificador espiral mostrou uma excelente eficiência na padronização do teor de finos < 75 µm, estando os resultados médios das pilhas abaixo de 3,5%;
- o homogeneizador desenvolvido nesta pesquisa mostrou-se de grande importância e de baixo custo, capaz de reduzir a variabilidade da absorção de água da areia reciclada para uma amplitude de variação de apenas 2,4%, considerada satisfatória;
- as propriedades de densidade de massa aparente, densidade de massa específica e o módulo de finura da areia reciclada também tiveram sua variação reduzida;

- em relação às propriedades no estado fresco da argamassa, no traço fixado nesta pesquisa, a consistência também teve sua variação reduzida, mas para o teor de ar aprisionado a variação aumentou levemente, influenciando em diversas outras propriedades;
- considera-se interessante que o teor de ar aprisionado não apresente uma amplitude de variação maior que 7%, o que significa limitar a amplitude de variação da densidade de massa fresca em, aproximadamente, 140 kg/m³. A alteração do método de mistura das argamassas poderá reduzir sensivelmente a variação do teor de ar das argamassas e isto deverá ser avaliado em pesquisa futura;
- no estado endurecido, também foi possível reduzir ou manter constante, em relação às Fases 1, 3 e 4, a variação obtida na resistência mecânica, retração por secagem e absorção capilar, sendo considerados bons resultados;
- a densidade de massa endurecida mostrou ser uma propriedade interessante no controle de qualidade, uma vez que se confirmou boa correlação com a resistência à compressão e exige custo muito menor;
- os revestimentos de argamassa apresentaram bom desempenho quanto ao surgimento de fissuras e resistência superficial. Assim como na Fase 4, o grau de fissuração, em cm/m², esteve correlacionado com o teor de finos < 75 µm. Por uma análise visual, considera-se o resultado obtido de 30 cm de fissura por m² de revestimento, com fissuras de abertura máxima de 0,4 mm, aceitável como um bom desempenho quanto à fissuração;
- apesar dos bons resultados obtidos, ainda não foi possível obter um processo sob controle estatístico de 3σ. Os níveis de qualidade variaram, aproximadamente, de 1 a 2σ;
- o plano de inspeção por variáveis adotado aqui rejeitou todas as pilhas de areia reciclada formadas para, pelo menos, uma das propriedades

testadas. Entretanto, considera-se este o plano mais factível de ser aplicado com o processo de reciclagem apresentado, por questões econômicas.

A Tabela 100 apresenta um resumo dos resultados desta Fase 5 que, comparativamente àqueles obtidos na Fase 4, facilitam a visualização da melhoria obtida.

É importante ressaltar que ambas as técnicas, de lavagem e de homogeneização, são de baixo custo de implementação, quando comparado ao custo total da usina, podem ser aplicadas para grandes escalas de produção de areia (acima de 100 m³/dia) e permitem a aplicação da areia reciclada em diferentes usos e com maior garantia de desempenho, visto a qualidade do agregado reciclado obtido. Isto significa maior mercado consumidor, maior valor agregado ao material reciclado e, portanto, maiores chances de retorno financeiro.

No caso da lavagem da areia reciclada, é necessário, para sua implementação em uma usina, a disponibilidade de água, área, licenciamento e, principalmente, de um processo de separação sólido-líquido para a reutilização da água de lavagem.

Tabela 100: Resumo comparativo dos resultados obtidos nas Fases 4 e 5 da pesquisa.

Propriedades	Processo de produção da areia reciclada		
	Fase 4: processo tradicional com areia não lavada	Fase 4: classificação visual e lavagem em peneira vibratória	Fase 5: lavagem em classificador espiral e formação de pilhas de homogeneização
Densidade de massa aparente (kg/m ³)	1079 a 1283	1079 a 1193	1148 a 1244
Teor de finos < 75 µm (%)	13,1 a 30,1	1,6 a 7,3	1,4 a 3,2
Absorção de água (%)	-	4,0 a 9,9	5,4 a 7,8
Resistência à compressão (MPa)	1,4 a 4,3	4,1 a 7,3	2,0 a 5,0
Densidade de massa fresca (kg/m ³)	1678 a 1902	1714 a 1864	1733 a 1924

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões desta tese estão subdivididas nos seguintes itens.

7.1 Programa experimental

Quanto ao Programa Experimental, podem ser feitas as seguintes afirmações:

- a) os resultados da Fase 1, na qual foram utilizadas amostras de areia reciclada por processo original da usina de Socorro/SP e sem qualquer tratamento pós peneiramento, mostraram que o teor de finos < 75 µm e absorção de água dos agregados são as propriedades que mais apresentaram variação, influenciando significativamente nas propriedades das argamassas e no desempenho dos revestimentos quanto à fissuração, sendo assim propriedades críticas de controle. Os resultados desta fase confirmam que tal tipo de areia reciclada, com elevado teor de finos, não é indicada para a produção de argamassas de revestimento;
- b) os resultados da Fase 2 mostraram que apenas a técnica de controle granulométrico da areia reciclada por curvas normalizadas não seria o suficiente para se obter resultados satisfatórios, além da sua dificuldade e custos operacionais de aplicação em campo;
- c) os resultados da Fase 3, onde a areia reciclada foi lavada em laboratório em peneira de 0,15 mm, mostraram que a aplicação desta técnica reduziu a variabilidade das propriedades das argamassas e melhorou o desempenho dos revestimentos quanto à fissuração, principalmente quando o teor de finos era < 5%. Entretanto, era necessário ainda reduzir a variação dos resultados de absorção de água dos agregados e testar um procedimento de lavagem em campo;
- d) os resultados da Fase 4 mostraram que a redução de variação da absorção de água dos agregados, obtida com a aplicação da técnica de classificação visual do RCC e moagem da fração graúda pós-britagem, não foi suficiente, provavelmente pela quase ausência de RCC de origem em concretos nesta usina. Assim, por questões de mercado e pelo fato de algumas usinas terem

maior porcentagem deste material na composição, considera-se que ela deva ser aplicada em campo. Já a lavagem em peneira vibratória não se mostrou eficiente;

- e) os resultados da Fase 5 mostraram que a utilização de um classificador espiral para remoção dos finos da areia reciclada e do homogeneizador desenvolvido aqui para formação de pilhas de agregados foram duas alternativas extremamente úteis para redução da variabilidade, obtendo-se resultados satisfatórios para os agregados, argamassas e revestimentos;
- f) apesar dos bons resultados obtidos, não foi possível atingir um nível de controle estatístico de processo de 3σ ;
- g) comparando-se os limites de especificação estabelecidos para o controle de qualidade do produto com os resultados obtidos para as composições de RCC selecionados, observa-se que seria tolerável uma variação do teor de material cerâmico na composição entre 25% e 65%, para os materiais utilizados.

Assim, o Programa Experimental desenvolvido permite apresentar um roteiro para a produção e o controle de argamassas feitas de areia reciclada para revestimentos de paredes e tetos.

7.2 Proposta de método para produção e controle das argamassas produzidas em usinas de reciclagem de RCC classe A

A proposta abaixo pressupõe que será vendida areia lavada ou argamassa pré-misturada com cal hidratada, úmida, a granel ou ensacada. Ambos os produtos terão a vantagem fundamental de já estarem saturados e isto deve minimizar problemas de variação de consistência das argamassas.

7.2.1 Quanto ao processo de reciclagem

Na Figura 118 consta uma proposta de fluxo de reciclagem para a produção de argamassas pré-misturadas, comercializadas a granel ou ensacada, com areias recicladas de RCC classe A.

É um modelo flexível que permite, além da produção de areia para argamassas, a produção de brita corrida, agregados graúdos, agregados para produção de tijolos e concretos. O processo de lavagem é obrigatório e deve ser eficiente.

É importante que o britador seja dimensionado não somente pela sua capacidade de produção horária, como também pela dimensão máxima de RCC na entrada do processo. Caso contrário, a usina poderá ter dificuldades em reciclar resíduos de concreto, que é a fração mais nobre do RCC.

O tipo de britador primário e/ou secundário a ser utilizado, de mandíbula ou impacto, deve ser definido em função das condições do projeto, custo, análise de mercado e das vantagens e desvantagens de cada um descritas no item 2.9.5.

Por simplificação, na Figura 118 foi apresentado um exemplo de processo utilizando-se apenas um britador primário.

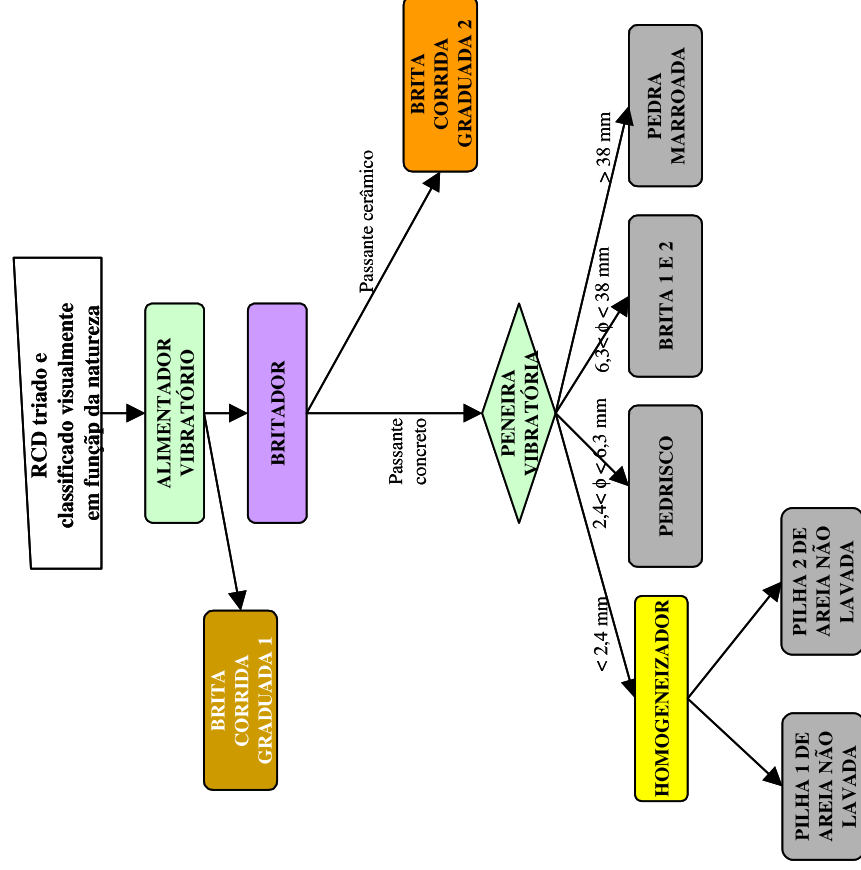
Por razões econômicas e ambientais, é importante retornar a água de lavagem para o sistema e conseguir uma aplicação para o material < 0,15 mm removido.

Recomenda-se a classificação visual do RCC nas frações cerâmica e concreto, uma vez que a aceitação do RCC reciclado de concreto no mercado é bem maior, além desta prática poder auxiliar na redução da variabilidade dos agregados.

Por isso, o modelo abaixo sugere que apenas a fração de concreto seja dividida em frações granulométricas, apesar de não impedir que o mesmo seja feito com a fração cerâmica ou mista. Esta, após britagem, é preferível que seja vendida como brita corrida ou moída e lavada para a produção de argamassas.

O peneiramento da areia a ser lavada pode ser feito em telas de 2,4 mm a 1,2 mm, dependendo da análise de mercado, da aplicação e do desempenho desejado. Se possível, deve-se optar pelo peneiramento em tela de 2,4 mm, por assim criar um material de menor custo de produção e menor risco de pulverulência ou fissuração. A areia fina normalmente é mais cara, podendo ser mais interessante economicamente, mas pode trazer problemas de desempenho a médio e longo prazo em edificações sujeitas a agentes mecânicos ou climáticos mais agressivos.

O projeto da usina deve prever a formação de duas pilhas de homogeneização para as areias, sendo que, enquanto uma esta em formação, a outra estará sendo caracterizada e comercializada.



(a)

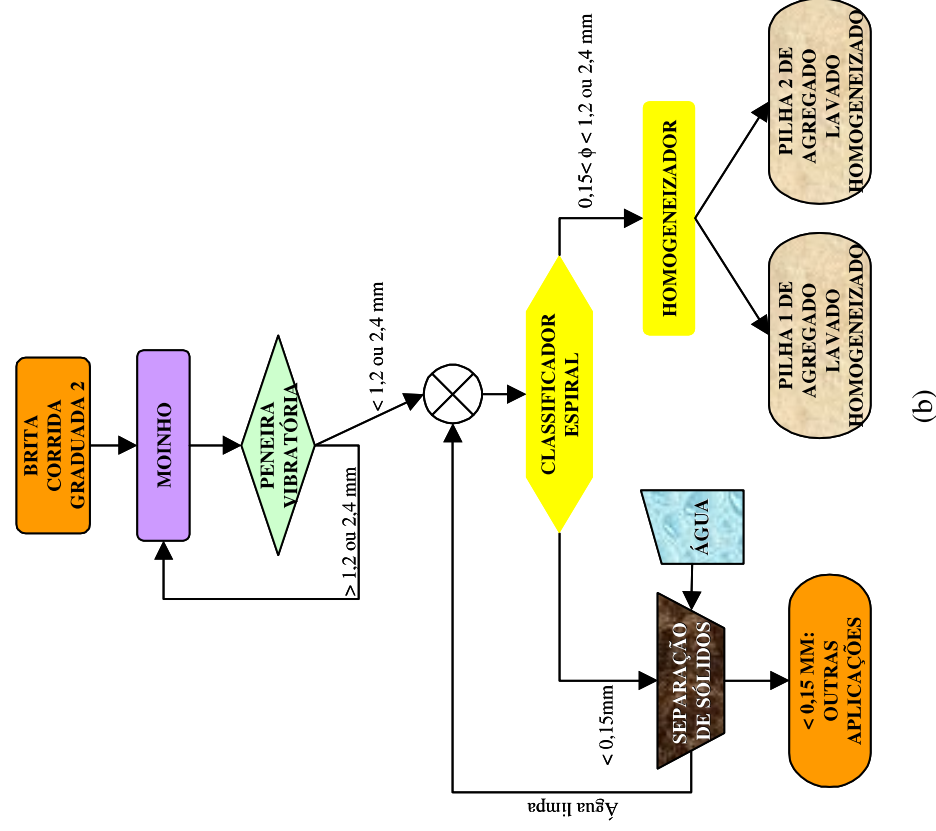


Figura 118: Modelo de usina de reciclagem para produção de argamassas. (a) Processo para produção de agregados reciclados a partir de RCC de concreto. (b) Processo de lavagem da brita corrida de origem em RCC cerâmico para a produção de areia reciclada lavada ou argamassas.

7.2.2 Quanto à formação de lotes e plano de amostragem

Recomenda-se que, em estágios iniciais de produção, cada pilha de areia reciclada lavada de, no máximo, 500 m³, deverá ser considerada um lote. Este tamanho de lote é um pouco mais severo que a NBR 15114/04 e NBR 15116/04 e do que algumas recomendações estrangeiras, mas não inviabiliza economicamente a realização do controle de qualidade.

Considerando que o processo de reciclagem recomendado inclui o uso de um homogeneizador com movimento radial, a possibilidade de formação de pilhas de grandes volumes e que o RCC antes da formação da pilha é heterogêneo, a melhor

maneira de se tomar sub-amostras representativas é desviando uma parte da areia reciclada no momento de descarga do homogeneizador. Isto pode ser feito, por exemplo, colocando-se uma calha no final de cada extremidade de curso do homogeneizador e uma no centro, garantindo-se assim 3 sub-amostras formadas por cada camada constituidora da pilha.

O dimensionamento da massa mínima de cada amostra pode seguir o método de Pierre Gy, devendo atender também à massa mínima necessária para a execução dos ensaios.

Neste caso, considerando as propriedades de agregados e argamassas no estado fresco e endurecido, descritas na Tabela 102, estima-se uma massa seca mínima para realização destes ensaios de 20 kg para 3 repetições da mesma amostra. No caso de execução de painéis de revestimentos de 1 m², é suficiente uma massa seca adicional de 20 kg por cm de espessura.

A redução das amostras para a realização de cada ensaio deve seguir a NM 27/01.

O plano de inspeção da NBR 5429/85 recomendado é o nível de inspeção especial S1, com variabilidade desconhecida, método do desvio-padrão. Inicialmente, pode-se adotar como 4% o nível de qualidade aceitável (NQA), que deve ser reduzido à medida que a usina for aprimorando seu processo de produção.

Para este nível de inspeção, tem-se um tamanho de amostra igual a 3 para um regime de inspeção normal.

O regime de inspeção de um processo, iniciado sempre no modo normal, pode ser alterado para severo ou atenuado conforme o sistema de comutação descrito na Tabela 101, variando em cada regime o tamanho do lote e da amostra da seguinte forma:

- regime de inspeção severo: 1 lote a cada pilha de, no máximo, 500 m³, com 4 sub-amostras;
- regime de inspeção normal: 1 lote a cada pilha de, no máximo, 500 m³, com 3 sub-amostras;

- regime de inspeção atenuado: em primeira etapa, 1 lote a cada pilha de, no máximo, 500 m³, com 3 amostras. Em segunda etapa, 1 lote a cada 2 pilhas de, no máximo, 500 m³, com 3 sub-amostras.

Tabela 101: Sistema de comutação entre os regimes de inspeção no controle de qualidade, adaptado da NBR 5429/85.

De Para	Normal	Severo	Atenuado
Normal	-	Se 2 de 5 lotes consecutivos forem rejeitados.	Se 10 lotes consecutivos forem aprovados. Se mais 10 lotes consecutivos forem aprovados, aumentar o lote para a cada 2 pilhas.
Severo	Se 5 lotes consecutivos forem aprovados.	-	-
Atenuado	Se o lote foi rejeitado ou o processo se tornou irregular.	-	-

7.2.3 Quanto às propriedades a serem analisadas e limites de especificação

A Tabela 102 resume as propriedades que devem ser controladas durante o processo de produção de argamassas em usinas de reciclagem, bem como a amplitude máxima de variação.

Tabela 102: Propriedades a serem controladas e limites de especificação para controle de produção.

Propriedade	Amplitude de variação	Limites de especificação*
Absorção de água do agregado (%)	3,0	-
Teor de finos < 75 µm (%)	3,0	< 5,0
SO ₄ solúvel	-	< 0,077%
SO ₃ total	-	< 1%
Consistência (mm)	50	280 a 330
Densidade de massa fresca (kg/m ³)	150	> 1700
Resistência à tração na flexão (MPa)	1,0	> 0,5
Densidade de massa endurecida (kg/m ³)	200	-

* Para revestimentos internos

O módulo de finura do agregado é uma propriedade que pode ser incluída no plano de controle com o intuito principal de verificar falhas no processo de produção, como descrito na Tabela 103. Neste caso, a amplitude de variação não deve ultrapassar 0,4.

Propriedades relativas ao controle de sulfatos solúveis não são conclusões diretas desta tese, mas baseadas em requisitos relacionados através de parceria com o IGS de Munique, conforme AGUIAR (2004).

7.2.4 Quanto à aceitação ou rejeição do lote

Iniciar a produção do material no regime de inspeção normal, verificando para cada lote seu comportamento em relação aos limites de especificação.

Caso o lote apresente amostras com resultados fora dos limites de especificação, deve-se analisar a aceitação ou rejeição do lote em função da porcentagem defeituosa. Se a porcentagem defeituosa não ultrapassar, respectivamente, 39,62%, 18,86% e 8,0% (neste caso são utilizadas 4 amostras), para os regimes de inspeção atenuada, normal e severo, o lote é aprovado. Será reprovado se superar estes valores ou se um dos índices de qualidade for negativo (Q_s ou Q_i).

7.2.5 Quanto à verificação do problema – análise de causa e efeito

Caso sejam produzidas amostras fora de especificação, ou se for observada uma tendência de aproximação dos resultados aos limites, será necessário percorrer todo o sistema atrás da causa mais provável. Considerando que, para cada propriedade, existem várias razões, a montagem de um fluxo de verificação facilita muito o trabalho.

Assim, para as propriedades dos agregados e das argamassas, foi montada a Tabela 103 que orienta as possíveis causas do problema e quais partes do processo devem ser verificadas.

Para a questão da fissuração de revestimentos, foi desenvolvido o diagrama de causa e efeito mostrado na Figura 119.

Tabela 103: Resumo das possíveis causas de variação de uma propriedade segundo o modelo de usina proposto na Figura 118.

Propriedade	Possíveis causas	Verificar
Absorção de água	<ul style="list-style-type: none"> - Falha na formação da pilha - Falha na classificação visual do RCC 	<ul style="list-style-type: none"> - Número de camadas da pilha - Capacidade técnica do funcionário na classificação visual
Teor de finos < 75 µm	<ul style="list-style-type: none"> - Variações na alimentação de água - Variações na alimentação de RCC - Mudança de inclinação do classificador espiral 	<ul style="list-style-type: none"> - Registro, canos e bomba - Peneira, grelha do moinho, alimentação, transportador de correia - Inclinação do classificador
Módulo de finura	<ul style="list-style-type: none"> - Excesso de alimentação de água - Variações na alimentação de RCC - Peneira entupida, sobrecarregada ou danificada - Problemas no martelo ou grelha do moinho 	<ul style="list-style-type: none"> - Medir vazão, verificar registro - Peneira, grelha, funcionário da alimentação, correia transportadora - Desentupir ou trocar a tela da peneira, verificar a alimentação de RCC - Trocar ou desentupir a grelha, trocar o martelo
Consistência	<ul style="list-style-type: none"> - Problemas na lavagem - Falha na homogeneização - Falha na classificação visual do RCC - Erro na dosagem da água ou dos aglomerantes - Erro no teor de umidade do RCC 	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentação de água e RCC - Número de camadas da pilha - Treinar funcionário - Verificar balança ou volume do recipiente - Fazer nova caracterização
Densidade de massa fresca	<ul style="list-style-type: none"> - Erro na dosagem dos materiais - Problemas na lavagem - Falha na homogeneização - Falha na classificação visual do RCC 	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar balança ou volume do recipiente, treinar funcionário - Alimentação de água e RCC - Número de camadas da pilha - Treinar funcionário
Tração na flexão e densidade de massa endurecida	<ul style="list-style-type: none"> - Erro na dosagem dos materiais - Problemas na lavagem - Falha na homogeneização - Falha na classificação visual do RCC 	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar balança ou volume do recipiente - Alimentação de água e RCC - Número de camadas da pilha - Treinar funcionário
Resistência de aderência à tração do revestimento	<ul style="list-style-type: none"> - Erro na dosagem dos materiais - Problemas na preparação ou execução da alvenaria - Problemas no ensaio 	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar balança ou volume do recipiente - Limpeza, planicidade, presença de vazios na arg. de assentamento - Verificar equipamento, preparação técnica do laboratorista

A dosagem de cimento, cal e areia reciclada na proporção fixada nesta pesquisa pode ser inicialmente assumida pela usina como um traço piloto para revestimentos internos de paredes e tetos. O ajuste do traço e do consumo de cimento ou de cal pode ser feito, por exemplo, por método proposto em SELMO (1989).

Em revestimentos externos e, principalmente, de edifícios de múltiplos andares, os revestimentos de argamassa com areia reciclada devem, preferencialmente, ser aplicados em duas camadas, emboço e reboco, ou em camada única de espessura entre 20 e 25 mm.. Os prazos para aplicação de sistemas de revestimentos em duas camadas devem prever um período de 14 a 21 dias de secagem e retração da primeira camada. Igual ou maior período deve ser aguardado para a pintura desses revestimentos.

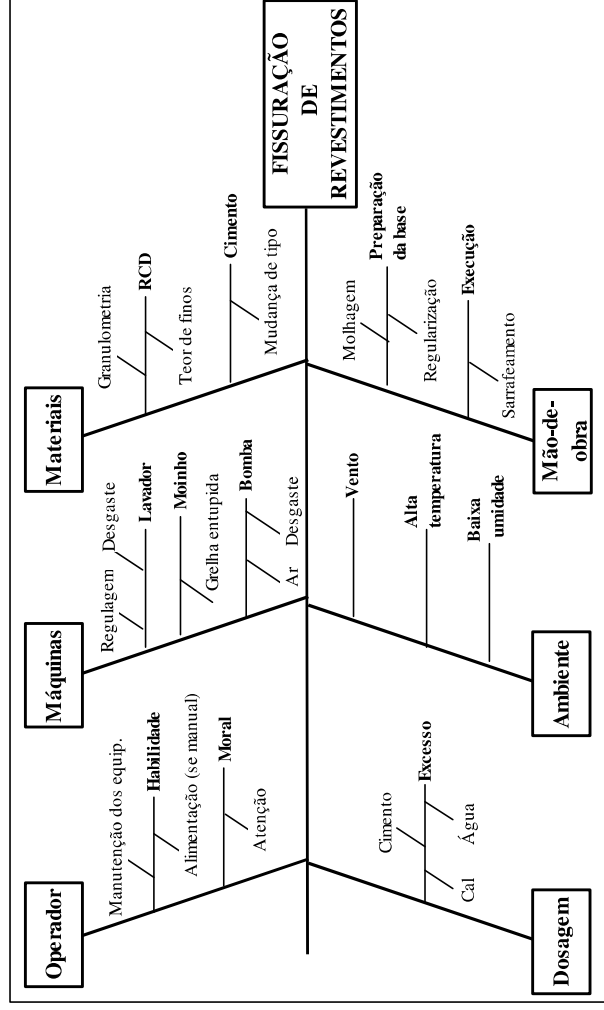


Figura 119: Diagrama de causa e efeito para o diagnóstico de anomalias em revestimentos de argamassa de areia reciclada lavada, segundo o modelo e o processo de reciclagem proposto.

7.3 Transfêrencia ao setor produtivo

Como já definido pelas premissas do programa experimental da tese, este trabalho promoveu o contato permanente do seu autor e orientador com diferentes segmentos da administração pública, do setor comercial e técnico, envolvidos na reciclagem de RCC, no Brasil e na Europa.

Já em 2002, esta tese viabilizou a elaboração do que tenha sido possivelmente o primeiro plano de negócio no Brasil, de caráter comercial para desenvolvimento de materiais reciclados e que foi amplamente difundido entre 2002 e 2003, na internet e imprensa escrita. O plano revestiu-se de importância ainda maior, por ter sido concebido com caráter sócio-ambiental sustentável, batizado como Construção Solidária, e está hoje divulgado pela seguinte publicação internacional:

- MIRANDA, L. F. R.; *et al.* A social environmental business plan for the production of recycled sand in the city of são paulo, brazil. In: THE 2005 WORLD SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE, Tokyo, 2005. **Proceedings**. Tokyo 2005. p. 4307-4314.

Diversos outros artigos sobre o programa experimental já foram publicados, durante o seu desenvolvimento, e pode-se listar os seguintes como principais:

- MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Argamassa com entulho reciclado. **Téchne**, 74. Maio/Junho, 2003. p. 68-71;
- MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Construction and demolition waste variability and its influence on masonry and plastering mortars properties. In: WASCON 2003 - PROGRESS ON THE ROAD TO SUSTAINABILITY. San Sebastián, 2003. **Proceedings**. . INASMET, San Sebastian, 2003;
- MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. A case study on the variation in the quality of mortars using CDW recycled sands. In: RILEM 2004, Barcelona, 2004. **Proceedings**. RILEM, Barcelona, 2004;
- MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Avaliação do desempenho de argamassas e revestimentos de RCD com o uso de aditivos incorporadores de

ar. In: **CONSTRUÇÃO 2004**, Porto, 2004. **Anais**. Faculdade de Engenharia, Porto, 2004. v.2, p.399-404.

Também o programa experimental desta tese viabilizou o desenvolvimento em paralelo de duas pesquisas de iniciação científica, PEREZ (2005) e SHIROMA (2005), e outras duas de mestrado, AGUIAR (2004) e NASCIMENTO (2005). A primeira trouxe importante contribuição para limites de contaminação em areias recicladas não lavadas, que são usadas em argamassas de assentamento de alvenarias, e a outra é relacionada à viabilidade técnica do processo de reciclagem via úmido aqui proposto, pela análise de soluções para a reciclagem da água e destinação da fração fina gerada pela lavagem.

7.4 Sugestões para pesquisas futuras

Após o desenvolvimento desta tese, algumas sugestões de continuidade podem ser dadas.

Considerando a eficiência do sistema de lavagem dos agregados, é importante desenvolver um processo que separe a fração sólida da água residual e retorne a água limpa para o sistema pelo menor custo de implantação e manutenção possível e ocupando o mínimo de área.

Tão importante é desenvolver novas aplicações para o resíduo sólido removido da água, uma vez que este não deve ser descartado por questões ambientais e de custo.

Com o atual estágio das pesquisas na área de cimento de escória, é possível começar a testar sua utilização com agregados reciclados visando a produção de componentes para a construção civil.

Um processo de produção e controle de outros materiais também deve ser desenvolvido, como para tijolos e blocos de alvenaria ou outros tipos de agregados.

Com relação ao procedimento de controle de qualidade, entende-se que ainda devem ser otimizados os métodos de avaliação da absorção de água dos agregados e ainda da sua forma de mistura em argamassas.

A evolução de procedimentos na caracterização de finos da reciclagem por granulometria a laser também precisa ser aprofundada de modo a esclarecer diferenças entre os métodos de dispersão empregados comparativamente nesta pesquisa.

Por fim, considera-se recomendável a evolução de estudos da microestrutura de argamassas com areias recicladas, de modo a melhor elucidar como a sua porosidade intrínseca afeta a reologia, a retração por secagem e propriedades mecânicas das argamassas.

ANEXOS

- A) Caracterização química, física e mecânica dos cimentos e da cal utilizados na pesquisa.
- B) Resultados da caracterização física das amostras de areias recicladas de RCC selecionados, obtidos na usina de reciclagem de Socorro/SP.
- C) Resultados da caracterização física e química das amostras de areia reciclada lavadas e não lavadas, obtidas na usina de reciclagem de Socorro/SP.
- D) Resultados dos ensaios de granulometria a laser das amostras de areias recicladas não lavadas, lavadas e com RCC selecionados.
- E) Resultados da caracterização no estado fresco das argamassas produzidas com as amostras lavadas e não lavadas de areias recicladas, obtidas na usina de reciclagem de Socorro/SP.
- F) Resultados dos ensaios de caracterização no estado endurecido dos corpos-de-prova.
- G) Utilização de aditivos em argamassas e revestimentos feitos com areias recicladas.
- H) Números randômicos obtidos para amostragem de materiais, através da ASTM D 3665/99.
- I) Resultados de variação da absorção das areias lavadas da Fase 4 em função do tempo.
- J) Orientação para a montagem de laboratório de controle de areia reciclada e argamassas.

Anexo A. Caracterizações químicas, físicas e mecânicas dos cimentos e da cal utilizados na pesquisa

A.1. Caracterização dos cimentos pela ABCP – Associação Brasileira de Cimentos Portland – Laudos 22032 e 22033

Data: 26/08/02 e 23/09/02

Tabela A.1.1. Caracterização física e mecânica dos cimentos das Fases 1 a 3

Ensaio	Norma	CPII F 32		CPIII 40 RS	
		Valor	Limite	Valor	Limite
Finura - resíduo na peneira de 75 µm (%)	11579/91	5,9	< 12	0,3	< 8,0
Massa específica (kg/m ³)	NBR NM23/01	3070	-	3000	-
Área específica (m ² /kg)	NBR NM 76/98	325	> 260	401	>300
Água de pasta de consistência normal (%)	NBR 11580/91	24,9	-	29,2	-
Início de pega (h:min)	NBR 11581/91	03:30	> 1h	02:15	> 1h
Fim de pega (h:min)	NBR 11581/91	04:50	< 10h	03:25	< 10h
Expansibilidade Le Chatelier a quente (mm)	NBR 11582/91	0,5	< 5,0	0,5	< 5,0

Tabela A.1.2. Resistência à compressão média em MPa NBR 7215/96 dos cimentos das Fases 1 a 3

Idade	CPII F 32		CPIII 40 RS	
	Valor	Limite	Valor	Limite
3	20,4	>10	21,6	>12
7	26,7	>20	33,9	>23
28	34,8	>32	50,6	>40

* O CP II F 32 apresentou grumos de hidratação

Tabela A.1.3. Composição química dos cimentos das Fases 1 a 3

Ensaio	Norma	CPII F 32		CPIII 40 RS	
		Valor	Limite	Valor	Limite
Perda ao fogo (PF)	NBR 5743/89	5,41	<6,5%	2,51	<4,5%
Dióxido de silício total (SiO ₂)	NBR 8347/91	18,32	-	26,95	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	NBR 9203/85	4,01	-	8,62	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	NBR 9203/85	4,09	-	1,97	-
Óxido de cálcio total (CaO)	NBR 9203/85	62,74	-	52,25	-
Óxido de magnésio (MgO)	NBR 9203/85	1,78	<6,5%	4,41	-
Anidrido sulfúrico (SO ₂)	NBR 5745/89	1,9	<4,0%	1,51	<4,0%
Óxido de sódio (Na ₂ O)	NBR 5747/89	0,03	-	0,06	-
Óxido de potássio (K ₂ O)	NBR 5747/89	0,77	-	0,48	-
Total	***	99,05	-	98,98	-
Anidrido carbônico (CO ₂)	NBR 11583/90	4,45	<5,0%	1,83	<3,0%
Resíduo insolúvel (RI)	NBR 5744/89	0,75	<16,0%	0,25	<1,5%
Óxido de cálcio livre CaO livre	NBR 7227/90	1,28	-	0,87	-
Equivalente alcalino em Na ₂ O	***	0,53	-	0,38	-
0,658 x %K ₂ O + %Na ₂ O					

Cimento	Teor de álcalis		Equivalente alcalino (%)
	Na ₂ O	K ₂ O	
CP II F 32	0,03	0,64	0,45
CP III 40 RS Cauê	0,03	0,39	0,29

Tabela A.1.4. Composição química dos cimentos das Fases 4 e 5, em % de óxidos

Amostra	LCT / PMI – Certificado 079/04, N° 0640/04 – Fase 4											
	LCT / PMI – Certificado 588/05, N° 6117/05 – Fase 5											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF
CP III 32 RS – Fase 4	29,8	10,3	1,44	0,43	4,33	49,2	0,2	0,48	0,45	<0,10	0,93	0,67
CP III 32 RS – Fase 5	30,9	9,99	1,43	0,43	4,30	48,9	0,28	0,49	0,46	<0,10	0,87	1,13

Anexo A.2. Caracterização da cal CH III

Tabela A.2.1. Ensaio físicos da cal CH III utilizada até a Fase 4

Densidade de massa dos grãos (picnômetro de Hélio)	2591 kg/m ³
Densidade de massa aparente (NBR 12127/91)	611 kg/m ³
Densidade de massa aparente (NBR 7251/82)	760 kg/m ³

Tabela A.2.2. Composição química por FRX, com resultados em % de óxidos

LCT / PMI - Certificado 079/04, N° 0639/04 – até a Fase 4

LCT / PMI – Certificado 588/05, N° 6118/05 – Fase 5

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF
Cal CH III até a Fase 4	5,5	0,55	0,23	<0,10	28,4	41,3	<0,10	0,12	<0,10	<0,11	<0,12	22,1
Cal CH III da Fase 5	5,16	0,36	0,20	<0,10	25,2	36,6	0,12	0,13	<0,10	<0,10	<0,10	30,8

Anexo B. Resultados da caracterização física das amostras de areias recicladas de RCC selecionados, obtidos na usina de reciclagem de Socorro/SP e utilizados na formação de 10 composições de agregados estudadas em laboratório nas Fases 1 a 3

Amostra	Massa aparente (kg/m³) NBR 7251/82	Massa específica (kg/m³) NBR 6508/88	Absorção de água (%) NBR 9777/87	Teor de mat. pulverulentos (%) NBR 7219/87	Dim. máx. caract. (mm) NBR 7217/87	Módulo de finura NBR 7217/87
Cerâmica	1071	2710	11,5	23%	4,8	2,12
Concreto	1330	2640	5,5	6%	4,8	2,92
Argamassa	1311	2620	5,0	12%	2,4	2,06

Anexo C. Resultados da caracterização física e química das areias recicladas lavadas e não lavadas, obtidas na usina de reciclagem de Socorro/SP – Fases 1, 4 e 5 da pesquisa

Tabela C.1. Resultados de caracterização física das amostras não lavadas (S1 NL a S45 NL), usadas nas Fases 1 e 4 da pesquisa

Amostra	Densidade de massa aparente (kg/m³)	Densidade de massa específica (kg/m³)	Teor de finos <75 µm (%)	Dim. máx. característica (mm)	Módulo de finura	PH	Resistividade 10 min (K.ohm.cm)	Matéria orgânica (ppm)	Teor de sulfatos (%)	Inchamento
S1 NL	1219	2638	18,0	4,8	2,05	10,45	4,3	< 300	0,111	-
S2 NL	1132	2648	22,9	4,8	2,09	9,38	3,5	< 300	0,118	-
S3 NL	1116	2648	14,5	4,8	2,22	9,52	1,9	< 300	0,108	-
S4 NL	1051	2653	21,4	2,4	1,71	9,04	4,1	< 300	0,069	1,40
S5 NL	1089	2630	18,1	2,4	2,03	11,43	2,7	< 300	0,154	1,39
S6 NL	1146	2615	14,6	2,4	2,10	10,44	3,4	< 300	0,143	1,32
S7 NL	1264	2655	25,2	2,4	1,72	11,14	1,9	< 300	0,081	-
S8 NL	1307	2646	22,6	4,8	1,96	9,6	3,1	< 300	0,105	1,36
S9 NL	1301	2639	19,8	4,8	2,09	10,83	2,7	< 300	0,131	-
S10 NL	1212	2661	20,7	2,4	1,86	11,69	1,9	< 300	0,067	-
S11 NL	1189	2681	21,8	2,4	1,81	10,77	3,8	>300	0,062	-
S12 NL	1242	2668	23,4	2,4	1,71	11,13	2,3	< 300	0,090	1,36
S13 NL	1199	2655	29,2	2,4	1,53	9,63	3,3	>300	0,130	-
S14 NL	1136	2700	22,0	2,4	1,70	9,22	2,7	=300	0,164	-
S15 NL	1189	2552	19,4	2,4	2,04	9,53	3,6	>300	0,099	-
S16 NL	1153	2668	32,9	2,4	1,38	10,57	4,0	=300	0,098	1,41

S17 NL	1152	2662	25,1	2,4	1,74	-	-	-	-	-
S18 NL	1154	2540	25,5	2,4	1,71	9,5	5,2	< 300	0,134	-
S19 NL	1101	2602	20,3	2,4	1,75	9,61	4,8	< 300	0,076	-
S21 NL	1194	3069	36,0	1,2	1,20	10,61	3,7	=300	0,099	-
S22 NL	1196	2514	37,5	1,2	1,15	9,65	3,8	=300	0,149	-
S23 NL	1191	-	29,3	2,4	1,16	-	-	-	-	-
S24 NL	1119	-	34,3	2,4	1,67	-	-	-	-	-
S25 NL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S26 NL	1197	-	17,2	4,8	2,27	-	-	-	-	-
S27 NL	1268	-	23,1	2,4	2,08	-	-	-	-	-
S28 NL	1235	2660	18,1	2,4	1,94	-	-	-	-	-
S29 NL	1283	-	24,7	2,4	1,89	-	-	-	-	-
S30 NL	1184	2665	17,6	2,4	2,02	-	-	-	-	-
S31 NL	1159	-	22,9	2,4	1,75	-	-	-	-	-
S32 NL	1240	-	17,7	2,4	1,75	-	-	-	-	-
S33 NL	1084	-	23,9	2,4	1,49	-	-	-	-	-
S34 NL	1189	2590	13,1	2,4	1,95	-	-	-	-	-
S35 NL	1233	2658	20,7	2,4	1,71	-	-	-	-	-
S36 NL	1232	-	23,4	4,8	1,89	-	-	-	-	-
S37 NL	1171	-	16,3	2,4	2,02	-	-	-	-	-
S38 NL	1132	2635	16,3	2,4	2,02	-	-	-	-	-
S39 NL	1130	-	17,2	2,4	1,96	-	-	-	-	-
S40 NL	1218	-	30,1	2,4	1,65	-	-	-	-	-
S41 NL	1174	-	17,9	2,4	1,91	-	-	-	-	-
S42 NL	1088	2658	18,6	4,8	2,14	-	-	-	-	-
S43 NL	1079	-	20,6	2,4	1,89	-	-	-	-	-
S44 NL	1133	-	20,6	2,4	1,81	-	-	-	-	-
S45 NL	1174	-	18,6	2,4	1,82	-	-	-	-	-

Tabela C.2. Resultados de caracterização física das areias recicladas lavadas (S26 LU a S81 LU), das Fases 4 e 5 da pesquisa

Amostra	Densidade de massa aparente seca (kg/m ³)	Densidade de massa aparente úmida (kg/m ³)	Teor de umidade (%)	Densidade de massa específica (kg/m ³) Picn. Hélio	Absorção de água (%)	Teor de finos <75 µm (%)	Dim. máx. característica (mm)	Módulo de finura
S26 LU	1118	1303	38	2699	6,8	2,7	1,2	1,93
S27 LU	1193	1343	32	2702	4,7	2,4	1,2	1,92
S28 LU	1187	1394	40	2652	4,8	1,6	1,2	1,92
S29 LU	1118	1504	36	2671	4,7	4,3	1,2	1,90
S30 LU	1111	1381	39	2615	5,0	7,1	1,2	1,72
S31 LU	1132	1398	40	2687	4,2	5,3	1,2	1,79
S32 LU	1180	1404	35	2665	4,0	4,1	1,2	1,98
S33 LU	1132	1415	39	2660	4,2	4,4	1,2	1,92
S34 LU	1122	1387	38	2597	6,0	2,9	1,2	2,21
S35 LU	1109	1376	47	2623	7,1	4,3	1,2	1,86
S36 LU	1133	1315	38	2650	4,2	3,0	1,2	2,03
S37 LU	1113	1323	39	2624	5,7	1,7	1,2	2,03
S38 LU	1084	1255	43	2666	9,6	2,2	1,2	1,94
S39 LU	1079	1184	41	2676	9,9	2,1	1,2	1,90
S40 LU	1096	1414	38	2632	6,0	3,4	1,2	1,80
S41 LU	1096	1271	39	2615	8,1	3,4	1,2	1,94
S42 LU	1116	1283	41	2643	8,5	3,0	1,2	1,96
S43 LU	1116	1326	40	2633	7,2	3,4	1,2	1,87
S44 LU	1111	1272	37	2630	4,4	4,7	1,2	1,88
S45 LU	1107	1281	37	2605	7,1	4,6	1,2	1,95
S46 LU	1279	-	-	2649	4,4	1,4	2,4	2,41
S47 LU	1288	-	-	-	4,2	1,5	2,4	2,52

S48 LU	1245	-	-	-	4,4	1,5	2,4	2,46
S49 LU	1149	-	-	2665	6,6	2,7	2,4	2,37
S50 LU	1141	-	-	-	7,1	2,1	2,4	2,60
S51 LU	1160	-	-	-	6,1	2,5	2,4	2,47
S52 LU	1150	-	-	2662	5,8	2,3	2,4	2,66
S53 LU	1167	-	-	-	6,1	2,2	2,4	2,50
S54 LU	1157	-	-	-	5,4	2,9	2,4	2,40
S55 LU	1194	-	-	2629	5,5	2,7	2,4	2,39
S56 LU	1115	-	-	-	5,7	3,1	2,4	2,26
S57 LU	1172	-	-	-	5,0	2,4	2,4	2,51
S58 LU	1159	-	-	2623	5,0	3,4	2,4	2,29
S59 LU	1159	-	-	-	5,2	3,4	2,4	2,28
S60 LU	1178	-	-	-	6,0	2,7	2,4	2,36
S61 LU	1150	-	-	2633	6,1	2,9	2,4	2,38
S62 LU	1146	-	-	-	5,1	2,8	2,4	2,43
S63 LU	1165	-	-	-	5,4	2,3	2,4	2,43
S64 LU	1216	-	-	2626	6,0	1,9	2,4	2,40
S65 LU	1204	-	-	-	5,8	2,0	2,4	2,34
S66 LU	1199	-	-	-	5,8	1,6	2,4	2,48
S67 LU	1250	-	-	2648	5,1	1,4	2,4	2,40
S68 LU	1244	-	-	-	5,5	1,4	2,4	2,40
S69 LU	1237	-	-	-	5,7	1,5	2,4	2,34
S70 LU	1146	-	-	2627	7,2	2,5	2,4	2,24
S71 LU	1152	-	-	-	7,7	2,2	2,4	2,30
S72 LU	1146	-	-	-	8,5	1,9	2,4	2,32
S73 LU	1203	-	-	2618	6,3	2,1	2,4	2,16
S74 LU	1208	-	-	-	6,8	1,9	2,4	2,18
S75 LU	1201	-	-	-	7,2	1,8	2,4	2,15
S76 LU	1199	-	-	2598	6,0	3,1	2,4	2,32

S77 LU	1228	-	-	-	5,4	2,5	2,4	2,40
S78 LU	1213	-	-	-	5,5	2,9	2,4	2,29
S79 LU	1218	-	-	2627	5,1	2,0	2,4	2,49
S80 LU	1222	-	-	-	5,7	1,7	2,4	2,54
S81 LU	1229	-	-	-	5,7	1,4	2,4	2,55

Tabela C.3. Resultados da análise química quantitativa por fluorescência de raios-X de areias recicladas lavadas da Fase 4

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica – LCT

Data: 04/02/04

Certificado: 079/04 – N° LCT 0625/04 a 0634/04

Composição química FRX – Resultados em % de óxidos

Amostra	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MnO	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	TiO₂	P₂O₅	SO₃	PF
S31 LU	75	8,38	3,08	<0,10	0,77	4,79	0,26	1,6	0,63	<0,10	0,38	5,18
S32 LU	75,7	8,22	3,06	<0,10	0,82	4,28	0,47	2,51	0,58	<0,10	<0,10	4,35
S33 LU	74,2	9,43	3,73	<0,10	0,84	4,29	0,38	1,89	0,62	<0,10	<0,10	5,03
S34 LU	76,6	6,99	2,58	<0,10	0,99	5,15	0,18	1,42	0,48	<0,10	<0,10	5,15
S36 LU	71,9	8,25	3,56	<0,10	1,12	6,32	0,36	1,41	0,65	<0,10	<0,10	6,24
S38 LU	73,1	10,6	3,57	<0,10	0,92	4,57	<0,10	0,92	0,67	<0,10	<0,10	6,33
S39 LU	71,7	11,5	3,95	<0,10	1,01	4,51	0,12	1,07	0,69	<0,10	0,16	5,96
S41 LU	71,5	8,36	3,34	<0,10	1,23	6,83	0,29	1,25	0,64	<0,10	0,14	6,67
S42 LU	73,1	7,85	3,35	<0,10	1,4	6,3	0,26	1,24	0,73	<0,10	<0,10	6,15
S43 LU	72	7,53	3,38	<0,10	1,23	6,39	0,22	1,11	0,68	<0,10	<0,10	7,07

Tabela C.4. Resultados da análise química de areias recicladas lavadas (LU) da Fase 5 para determinação de sais solúveis, sulfatos solúveis, sulfatos insolúveis, resíduo insolúvel e sulfato total

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Laboratório de Química de Materiais

Data: junho de 2005 – Laudos 18.677 a 18.686

Amostra	Resultados em %			
	Resíduo insolúvel	Anidrido sulfúrico total (SO ₃)	Sulfatos solúveis (SO ₄ ⁻²)	Sais solúveis
S52 LU	85,3	0,20	0,11	0,44
S55 LU	84,0	0,18	0,07	0,37
S58 LU	86,2	0,14	0,05	0,34
S61 LU	85,7	0,18	0,08	0,41
S64 LU	85,6	0,17	0,07	0,45
S67 LU	85,4	0,15	0,06	0,45
S70 LU	84,1	0,14	0,06	0,37
S73 LU	82,6	0,22	0,07	0,44
S76 LU	84,4	0,24	0,09	0,47
S79 LU	85,8	0,17	0,05	0,40

Anexo D. Resultados dos ensaios de granulometria a laser das amostras de areia reciclada não lavadas, lavadas e com RCC selecionado

Tabela D.1.1. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras de areias recicladas com RCC selecionados - LCT / PMI – Meio de dispersão: água deionizada

Diâmetro (mm)	% Passante acumulada	
	Cerâmica	Argamassa Concreto
2,06	100	99,91
1,73	99,95	98,91
1,45	99,46	95,85
1,22	97,43	89,66
1,03	93,35	80,03
0,86	86,92	67,77
0,72	78,81	54,98
0,61	70,34	43,64
0,51	62,47	34,27
0,43	55,6	26,81
0,36	49,7	21,08
0,30	44,7	16,81
0,25	40,39	13,59
0,21	36,59	11,16
0,18	33,11	9,29
0,15	29,84	7,79
0,13	26,79	6,64
0,11	23,96	5,69
0,089	21,37	4,89
0,075	19,04	4,22
0,063	16,96	3,64
0,053	15,12	3,15
0,045	13,51	2,74
0,037	12,08	2,4
0,031	10,83	2,12
0,026	9,71	1,87
0,022	8,72	1,64
0,019	7,83	1,41
0,016	7,04	1,21
0,013	6,32	1,03
0,011	5,66	0,88
0,009	5,06	0,75
0,008	4,49	0,65
0,007	3,96	0,57
0,006	3,45	0,5
0,005	2,98	0,43

Tabela D.2. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras de areia reciclada não lavada, utilizadas nas Fases 1 e 3

LCT / PMI – Meio de dispersão: água deionizada

Diâmetro (mm)	% Passante acumulada, em massa									
	S1 NL	S4 NL	S5 NL	S12 NL	S16 NL	S22 NL	S22 NL	S16 NL	S12 NL	S5 NL
4,80	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,40	93,1	97,5	95,4	98,0	98,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,22	81,5	89,2	84,0	88,5	88,5	94,5	94,5	94,5	94,5	99,7
1,03	81,4	89,1	83,9	88,3	88,3	94,5	94,5	94,5	94,5	99,6
0,86	80,3	87,9	82,6	86,6	86,6	93,7	93,7	93,7	93,7	98,2
0,72	78,0	85,3	79,7	83,2	83,2	91,6	91,6	91,6	91,6	95,2
0,61	74,3	81,3	75,2	78,2	78,2	88,4	88,4	88,4	88,4	90,6
0,51	69,5	76,3	69,5	71,8	71,8	84,0	84,0	84,0	84,0	84,6
0,43	64,0	70,4	63,0	64,6	64,6	78,7	78,7	78,7	78,7	77,6
0,36	58,1	64,3	56,4	57,1	57,1	73,0	73,0	73,0	73,0	70,1
0,30	52,5	58,2	50,3	50,1	50,1	67,2	67,2	67,2	67,2	62,6
0,25	47,2	52,4	44,8	43,8	43,8	61,5	61,5	61,5	61,5	55,6
0,21	42,5	47,1	39,9	38,2	38,2	56,2	56,2	56,2	56,2	49,1
0,18	38,1	42,1	35,6	33,4	33,4	51,3	51,3	51,3	51,3	43,2
0,15	34,2	37,6	31,8	29,3	29,3	46,7	46,7	46,7	46,7	38,1
0,13	30,7	33,5	28,5	25,9	25,9	42,4	42,4	42,4	42,4	33,6
0,11	27,5	29,7	25,6	22,9	22,9	38,5	38,5	38,5	38,5	29,7
0,09	24,5	26,3	22,9	20,4	20,4	34,8	34,8	34,8	34,8	26,4
0,07	21,8	23,1	20,5	18,2	18,2	31,3	31,3	31,3	31,3	23,4
0,06	19,2	20,3	18,3	16,3	16,3	28,0	28,0	28,0	28,0	20,9
0,053	16,9	17,7	16,3	14,6	14,6	25,0	25,0	25,0	25,0	18,6
0,045	14,9	15,5	14,5	13,1	13,1	22,2	22,2	22,2	22,2	16,6
0,037	13,1	13,6	13,0	11,8	11,8	19,6	19,6	19,6	19,6	14,7
0,031	11,5	11,9	11,6	10,6	10,6	17,3	17,3	17,3	17,3	13,1
0,026	10,1	10,5	10,4	9,5	9,5	15,3	15,3	15,3	15,3	11,7
0,022	8,9	9,3	9,4	8,6	8,6	13,4	13,4	13,4	13,4	10,4
0,019	7,9	8,2	8,4	7,8	7,8	11,8	11,8	11,8	11,8	9,3
0,016	7,0	7,3	7,6	7,0	7,0	10,4	10,4	10,4	10,4	8,3
0,013	6,1	6,5	6,8	6,3	6,3	9,2	9,2	9,2	9,2	7,4
0,011	5,4	5,7	6,1	5,7	5,7	8,0	8,0	8,0	8,0	6,6
0,009	4,8	5,1	5,4	5,1	5,1	7,0	7,0	7,0	7,0	5,9
0,0078	4,2	4,4	4,8	4,5	4,5	6,1	6,1	6,1	6,1	5,2
0,0066	3,6	3,9	4,2	4,0	4,0	5,3	5,3	5,3	5,3	4,5
0,0055	3,1	3,3	3,6	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	4,5	3,9
0,0046	2,7	2,8	3,1	3,0	3,0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,4
0,0039	2,2	2,4	2,6	2,6	2,6	3,2	3,2	3,2	3,2	2,9
0,0033	1,9	2,0	2,2	2,2	2,2	2,6	2,6	2,6	2,6	2,4
0,0027	1,5	1,6	1,8	1,8	1,8	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0
0,0023	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6

0,0019	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3
0,0016	0,7	0,5	0,9	1,0	1,0	1,0
0,0014	0,5	0,0	0,7	0,8	0,8	0,8
0,0012	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
0,00097	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4
0,00081	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3
0,00068	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3
0,00057	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
0,00048	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2
0,00040	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1
0,00034	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1
0,00029	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1
0,00024	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
0,00020	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
0,00017	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
0,00014	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
0,00012	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,00010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,00008	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,00007	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,00006	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela D.3. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras de areias recicladas não lavadas, utilizadas nas Fases 1 e 3

LCT / PMI – Meio de dispersão: álcool isopropílico

Diâmetro (mm)	% Passante acumulada, em massa							
	S1 NL	S4 NL	S5 NL	S12 NL	S16 NL	S22 NL	S22 NL	S22 NL
1,22	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,02	99,84	99,90	99,88	99,77	99,98	99,98	99,98	99,88
0,86	98,54	98,51	98,36	97,84	99,11	99,11	98,52	98,52
0,72	95,65	95,61	94,90	94,02	96,98	96,98	95,51	95,51
0,61	91,15	91,19	89,55	88,33	93,51	93,51	90,88	90,88
0,51	85,28	85,50	82,70	81,11	88,84	88,84	84,85	84,85
0,43	78,49	78,96	75,00	72,94	83,28	83,28	77,83	77,83
0,36	71,34	72,04	67,17	64,50	77,21	77,21	70,30	70,30
0,30	64,36	65,20	59,86	56,59	71,06	71,06	62,78	62,78
0,25	57,94	58,76	53,28	49,47	65,11	65,11	55,72	55,72
0,21	52,09	52,78	47,45	43,18	59,52	59,52	49,22	49,22
0,18	46,80	47,25	42,34	37,74	54,29	54,29	43,37	43,37
0,15	42,02	42,19	37,87	33,11	49,43	49,43	38,19	38,19
0,13	37,69	37,56	33,93	29,21	44,92	44,92	33,69	33,69
0,11	33,72	33,32	30,43	25,90	40,72	40,72	29,81	29,81
0,089	30,07	29,44	27,27	23,07	36,80	36,80	26,45	26,45
0,075	26,70	25,91	24,39	20,61	33,12	33,12	23,52	23,52
0,063	23,60	22,72	24,39	18,44	29,67	29,67	20,94	20,94
0,053	20,79	19,88	21,78	16,52	26,44	26,44	18,65	18,65
0,044	18,26	17,39	19,41	14,81	23,47	23,47	16,60	16,60
0,037	16,03	15,22	17,30	13,30	20,76	20,76	14,78	14,78
0,031	14,08	13,37	15,44	11,96	18,32	18,32	13,17	13,17
0,026	12,39	11,78	13,82	10,78	16,14	16,14	11,74	11,74
0,022	10,93	10,42	12,39	9,73	14,22	14,22	10,48	10,48
0,018	9,65	9,23	11,15	8,79	12,52	12,52	9,36	9,36
0,016	8,53	8,19	10,04	7,94	11,02	11,02	8,36	8,36
0,013	7,54	7,27	9,04	7,16	9,69	9,69	7,46	7,46
0,011	6,66	6,43	8,12	6,44	8,50	8,50	6,65	6,65
0,009	5,86	5,67	7,27	5,76	7,43	7,43	5,89	5,89
0,008	5,13	4,97	6,47	5,13	6,46	6,46	5,20	5,20
0,006	4,46	4,32	5,71	4,52	5,58	5,58	4,55	4,55
0,005	3,84	3,73	5,00	3,95	4,77	4,77	3,94	3,94
0,0046	3,28	3,17	4,33	3,42	4,04	4,04	3,38	3,38
0,0038	2,76	2,67	3,70	2,92	3,38	3,38	2,86	2,86
0,0033	2,29	2,21	3,12	2,46	2,79	2,79	2,39	2,39
0,0027	1,86	1,80	2,59	2,05	2,26	2,26	1,97	1,97
0,0023	1,49	1,44	2,12	1,68	1,81	1,81	1,60	1,60
0,0019	1,17	1,13	1,70	1,36	1,42	1,42	1,27	1,27
0,0016	0,90	0,86	1,34	1,08	1,09	1,09	1,00	1,00

0,0014	0,67	0,64	1,04	0,85	0,82	0,77
0,0011	0,48	0,46	0,79	0,66	0,60	0,58
0,00097	0,34	0,32	0,59	0,52	0,44	0,44
0,00081	0,23	0,21	0,43	0,41	0,31	0,33
0,00068	0,16	0,14	0,32	0,34	0,23	0,26
0,00057	0,10	0,09	0,24	0,28	0,16	0,20
0,00048	0,06	0,05	0,19	0,24	0,12	0,16
0,00040	0,02	0,02	0,15	0,21	0,08	0,12
0,00034	0,0	0,0	0,11	0,18	0,04	0,09
0,00029	0,0	0,0	0,08	0,15	0,03	0,08
0,00024	0,0	0,0	0,06	0,13	0,03	0,07
0,00020	0,0	0,0	0,05	0,10	0,02	0,05
0,00017	0,0	0,0	0,04	0,08	0,02	0,04
0,00014	0,0	0,0	0,03	0,06	0,01	0,03
0,00012	0,0	0,0	0,03	0,04	0,01	0,02
0,00010	0,0	0,0	0,02	0,03	0,01	0,01
0,00008	0,0	0,0	0,01	0,01	0,00	0,01
0,00007	0,0	0,0	0,01	0,01	0,00	0,00
0,00006	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00

**D.4. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras de areias recicladas não lavadas, utilizadas na Fase 4 (em %
passante acumulada, em massa)**

LCT / PMI – Certificados pares, 056/04 a 094/04 – Meio de dispersão: água deionizada

Diâmetro (mm)	S26 NL	S27 NL	S28 NL	S29 NL	S30 NL	S31 NL	S32 NL	S33 NL	S34 NL	S35 NL	S36 NL	S37 NL	S38 NL	S39 NL	S40 NL	S41 NL	S42 NL	S43 NL	S44 NL	S45 NL
3,47	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,92	100,0	100,0	100,0	99,1	99,6	99,4	99,5	99,8	99,1	100,0	99,5	99,9	99,9	99,1	99,7	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0
2,45	99,8	99,6	100,0	97,2	98,5	97,9	98,4	99,0	97,2	99,9	98,5	99,4	99,7	97,2	98,7	99,6	99,7	99,3	99,9	99,8
2,06	99,4	98,2	99,9	94,5	96,6	95,5	96,7	97,8	94,4	99,7	96,8	98,5	99,4	94,3	96,8	98,6	98,8	98,0	99,5	99,5
1,73	98,6	96,0	99,4	91,6	93,8	92,2	94,4	95,8	90,7	98,8	94,6	96,7	99,1	90,8	93,9	96,3	97,1	95,9	98,4	98,6
1,45	97,2	92,9	97,9	88,9	90,2	88,1	91,3	92,8	86,2	97,4	91,9	93,9	98,6	86,6	89,9	92,9	94,5	93,0	96,2	97,1
1,22	95,1	89,0	95,0	87,1	85,7	83,3	87,6	89,0	81,0	95,4	88,8	90,0	97,1	82,0	85,1	88,4	91,1	89,4	93,0	94,8
1,03	92,2	84,6	90,9	86,1	79,9	78,1	83,3	84,3	75,3	93,0	85,5	85,0	94,5	77,2	79,9	82,9	87,1	85,3	88,7	91,8
0,86	88,6	79,9	85,7	85,6	72,8	72,7	78,5	78,9	69,3	90,6	82,2	78,9	91,1	72,4	74,7	77,0	82,6	80,8	83,8	87,9
0,72	84,6	75,3	80,1	85,0	64,7	67,5	73,3	73,1	63,5	88,4	78,9	72,2	87,5	68,2	69,9	70,8	77,7	76,0	78,5	83,1
0,61	80,9	70,8	74,3	83,8	56,9	62,8	68,0	67,3	57,9	86,2	75,7	65,3	84,4	64,5	65,6	64,6	72,4	70,8	72,9	77,4
0,51	77,6	66,5	68,3	81,6	50,4	58,4	63,0	61,5	52,4	83,8	72,3	58,6	81,8	61,1	61,7	58,3	66,7	65,2	67,2	70,9
0,42	74,6	62,2	62,1	78,5	45,0	53,9	58,3	55,8	47,1	80,7	68,3	52,1	79,1	57,4	57,7	52,0	60,2	59,0	61,1	63,6
0,36	71,6	57,6	55,8	74,6	40,6	49,3	53,8	50,1	41,9	76,6	63,4	45,9	76,1	53,0	53,5	45,6	53,3	52,5	54,6	55,9
0,3	68,0	53,0	49,7	70,2	36,6	44,5	49,3	44,5	36,8	71,7	58,0	40,2	72,5	47,9	49,2	39,5	46,3	45,9	48,1	48,2
0,25	63,1	48,3	43,9	65,4	32,9	39,7	44,7	39,0	31,9	66,0	52,1	35,0	67,8	42,5	44,8	33,8	39,5	39,7	41,7	41,0
0,21	56,5	43,7	38,6	60,2	29,2	35,0	39,8	34,0	27,2	59,8	46,2	30,3	62,0	36,9	40,4	28,7	33,3	34,2	35,9	34,5
0,18	48,7	39,5	34,0	54,8	25,8	30,7	35,0	29,5	22,9	53,4	40,5	26,1	55,2	31,6	36,2	24,4	28,0	29,7	30,9	29,0
0,15	40,5	35,8	29,9	49,6	22,6	27,0	30,4	25,8	19,1	47,1	35,3	22,5	47,9	26,9	32,4	20,9	23,8	26,1	26,7	24,5
0,12	32,6	32,5	26,5	44,7	19,7	23,7	26,1	22,8	15,8	41,2	30,6	19,5	40,7	22,8	29,1	18,2	20,6	23,3	23,4	20,9
0,10	25,7	29,8	23,7	40,2	17,2	20,9	22,2	20,4	13,0	35,8	26,6	16,8	33,8	19,5	26,2	16,0	18,1	21,3	20,8	18,1
0,089	19,9	27,4	21,1	36,2	15,0	18,5	18,9	18,5	10,7	31,0	23,2	14,5	27,6	16,6	23,8	14,1	16,1	19,6	18,7	15,9

0,075	15,3	25,3	18,9	32,7	13,0	16,4	16,2	17,0	8,8	26,9	20,3	12,6	22,3	14,3	21,8	12,6	14,6	18,3	17,0	14,1
0,063	11,6	23,5	17,0	29,6	11,4	14,6	13,9	15,7	7,4	23,6	17,9	10,9	18,0	12,4	20,2	11,2	13,2	17,1	15,6	12,6
0,053	8,9	21,8	15,4	27,0	10,1	13,2	12,1	14,6	6,3	20,9	15,9	9,6	14,7	10,9	18,7	10,0	12,1	16,0	14,3	11,4
0,044	7,0	20,2	14,1	24,9	9,0	11,9	10,7	13,6	5,5	18,7	14,2	8,6	12,2	9,6	17,4	8,9	11,1	15,0	13,2	10,3
0,037	5,7	18,8	12,9	23,0	8,2	10,9	9,5	12,7	4,9	16,9	12,7	7,8	10,3	8,6	16,3	8,0	10,2	14,1	12,2	9,4
0,031	4,7	17,4	11,8	21,4	7,5	9,9	8,5	11,8	4,4	15,4	11,4	7,1	8,9	7,7	15,1	7,2	9,3	13,2	11,3	8,6
0,026	4,0	16,1	10,9	19,9	6,8	9,1	7,7	11,0	3,9	14,1	10,3	6,5	7,9	6,9	14,0	6,4	8,6	12,3	10,4	7,8
0,022	3,5	14,8	10,0	18,5	6,3	8,4	6,9	10,1	3,5	12,9	9,2	6,0	7,0	6,3	12,9	5,7	7,8	11,5	9,6	7,1
0,018	3,1	13,6	9,2	17,1	5,7	7,7	6,3	9,3	3,1	11,7	8,3	5,5	6,2	5,7	11,9	5,1	7,2	10,7	8,8	6,5
0,015	2,8	12,4	8,4	15,8	5,2	7,0	5,7	8,5	2,8	10,6	7,41	5,1	5,6	5,1	10,9	4,5	6,5	9,8	8,0	5,9
0,013	2,5	11,3	7,6	14,6	4,7	6,39	5,12	7,7	2,5	9,6	6,6	4,6	5,0	4,6	9,9	4,0	5,9	9,0	7,3	5,4
0,011	2,2	10,2	6,9	13,3	4,2	5,8	4,6	7,0	2,2	8,6	5,9	4,2	4,4	4,1	9,0	3,6	5,3	8,2	6,7	4,8
0,009	1,9	9,2	6,2	12,1	3,8	5,3	4,1	6,2	2,0	7,7	5,2	3,8	3,9	3,7	8,1	3,1	4,8	7,4	6,0	4,3
0,0078	1,7	8,2	5,5	10,9	3,4	4,7	3,7	5,6	1,7	6,8	4,6	3,4	3,4	3,2	7,2	2,7	4,3	6,7	5,4	3,9
0,0066	1,5	7,3	4,8	9,7	3,0	4,2	3,3	4,9	1,5	6,0	4,1	3,1	3,0	2,8	6,4	2,4	3,8	5,9	4,8	3,4
0,0055	1,3	6,3	4,3	8,6	2,6	3,7	2,9	4,2	1,3	5,2	3,6	2,7	2,6	2,5	5,6	2,0	3,3	5,2	4,3	3,0
0,0046	1,1	5,5	3,7	7,5	2,3	3,2	2,5	3,6	1,1	4,5	3,1	2,4	2,2	2,1	4,9	1,7	2,9	4,5	3,8	2,6
0,0039	1,0	4,7	3,2	6,5	2,0	2,8	2,1	3,1	0,9	3,8	2,6	2,0	1,9	1,8	4,2	1,5	2,4	3,8	3,2	2,3
0,0033	0,8	4,0	2,7	5,5	1,7	2,4	1,8	2,6	0,8	3,2	2,2	1,7	1,5	1,5	3,5	1,2	2,1	3,2	2,8	1,9
0,0027	0,7	3,4	2,3	4,6	1,4	2,0	1,5	2,1	0,6	2,7	1,9	1,5	1,3	1,3	3,0	1,0	1,7	2,7	2,4	1,6
0,0023	0,5	2,8	1,9	3,8	1,2	1,7	1,3	1,7	0,5	2,2	1,6	1,2	1,0	1,0	2,4	0,8	1,4	2,2	2,0	1,4
0,0019	0,4	2,3	1,6	3,1	0,9	1,4	1,0	1,4	0,4	1,8	1,3	1,0	0,8	0,8	2,0	0,6	1,2	1,8	1,6	1,1
0,0016	0,3	1,9	1,3	2,5	0,8	1,1	0,8	1,1	0,3	1,4	1,1	0,8	0,7	0,7	1,6	0,5	1,0	1,5	1,3	0,9
0,0013	0,2	1,5	1,1	2,0	0,6	0,9	0,7	0,9	0,2	1,1	0,9	0,6	0,5	0,5	1,3	0,4	0,8	1,2	1,1	0,7
0,0011	0,2	1,2	0,9	1,6	0,5	0,7	0,5	0,7	0,2	0,9	0,7	0,5	0,4	0,4	1,0	0,3	0,6	0,9	0,9	0,6
0,00090	0,1	1,0	0,8	1,3	0,4	0,6	0,4	0,5	0,1	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,8	0,2	0,5	0,7	0,7	0,5
0,00080	0,1	0,8	0,6	1,0	0,3	0,4	0,3	0,4	0,1	0,6	0,5	0,3	0,2	0,2	0,6	0,2	0,4	0,6	0,5	0,4
0,00070	0,0	0,7	0,6	0,8	0,2	0,4	0,3	0,3	0,0	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2	0,5	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3
0,00060	0,0	0,5	0,5	0,7	0,2	0,3	0,2	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3

Tabela D.5. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras de areias recicladas não lavadas, utilizadas na Fase 4
 (% passante acumulada, em massa)

LCT / PMI – Certificados pares, 056/04 a 094/04 – Meio de dispersão: álcool isopropílico

Diâmetro (mm)	S26 NL	S27 NL	S28 NL	S29 NL	S30 NL	S31 NL	S32 NL	S33 NL	S34 NL	S35 NL	S36 NL	S37 NL	S38 NL	S39 NL	S40 NL	S41 NL	S42 NL	S43 NL	S44 NL	S45 NL
3,47	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,92	100,0	100,0	100,0	99,2	99,7	99,5	99,6	99,8	99,1	100,0	99,6	99,9	100,0	99,4	99,7	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0
2,45	99,9	99,6	100,0	97,4	98,7	98,2	98,6	99,3	97,3	99,9	98,7	99,4	99,9	98,1	98,9	99,7	99,8	99,5	100,0	99,9
2,06	99,7	98,4	99,9	95,0	97,1	96,2	97,2	98,3	94,5	99,7	97,2	98,5	99,8	96,3	97,3	98,9	99,0	98,7	100,0	99,6
1,73	99,2	96,4	99,5	92,2	94,7	93,3	95,2	96,7	90,9	99,0	95,3	96,7	99,6	94,0	94,7	97,2	97,5	97,3	99,9	99,0
1,45	98,5	93,6	98,3	89,8	91,7	89,8	92,6	94,4	86,4	97,6	92,9	93,9	99,4	91,3	91,3	94,6	95,4	95,3	99,1	97,9
1,22	97,4	90,1	96,0	88,1	87,8	85,8	89,4	91,4	81,3	95,8	90,2	90,0	98,7	88,3	87,2	91,1	92,5	93,0	97,0	96,4
1,03	95,8	86,1	92,7	87,2	83,0	81,3	85,7	87,7	75,6	93,7	87,3	85,0	97,5	85,2	82,7	86,9	89,1	90,2	93,6	94,2
0,86	93,8	81,9	88,6	86,7	76,9	76,7	81,6	83,4	69,8	91,5	84,5	78,9	96,0	82,1	78,2	82,3	85,2	87,2	89,0	91,5
0,72	91,6	77,7	84,0	86,2	70,1	72,3	77,2	78,9	64,0	89,5	81,6	72,2	94,4	79,3	74,1	77,5	81,1	84,1	83,5	88,1
0,61	89,6	73,7	79,4	85,1	63,5	68,2	72,7	74,3	58,5	87,5	78,9	65,3	93,0	76,9	70,4	72,8	76,7	80,6	77,7	84,2
0,51	87,9	69,8	74,7	83,1	58,0	64,5	68,4	69,9	53,2	85,4	75,9	58,6	91,9	74,8	67,1	68,1	71,9	77,0	71,6	79,7
0,42	86,6	66,0	69,9	80,4	53,7	60,9	64,5	65,6	47,9	82,7	72,6	52,1	91,0	72,6	63,8	63,5	66,6	73,1	65,5	74,8
0,36	85,5	62,1	65,2	77,0	49,9	57,1	60,7	61,4	42,8	79,2	68,6	45,9	90,1	70,2	60,4	59,0	60,8	69,0	59,4	69,9
0,3	84,1	58,1	60,6	73,0	46,3	53,0	56,8	57,1	37,7	74,9	64,0	40,2	89,0	67,5	56,6	54,4	54,6	65,1	53,3	65,0
0,25	81,7	53,9	55,9	68,1	42,5	48,4	52,5	52,1	32,8	69,7	58,8	35,0	87,3	64,5	52,4	49,1	48,3	61,3	47,3	59,8
0,21	77,4	49,6	51,2	62,5	38,4	43,4	47,7	46,5	28,1	63,8	53,2	30,3	84,9	61,0	47,7	43,4	42,2	57,7	41,5	54,1
0,18	71,3	45,3	46,4	56,4	34,1	38,4	42,6	40,5	23,9	57,3	47,4	26,1	81,6	56,9	42,9	37,7	36,6	54,3	36,2	48,1
0,15	63,9	41,0	41,8	50,1	29,9	33,3	37,2	34,6	20,1	50,5	41,6	22,5	77,3	52,1	38,0	32,5	31,5	50,9	31,3	42,2
0,12	56,1	37,0	37,3	43,8	26,0	28,6	31,9	29,5	16,8	43,7	36,1	19,5	72,5	46,5	33,2	28,0	27,2	47,4	27,1	36,9
0,10	48,6	33,3	33,1	37,9	22,4	24,2	26,9	25,3	14,0	37,2	30,9	16,8	67,2	40,6	28,9	24,4	23,6	44,0	23,4	32,3
0,089	41,9	30,0	29,4	32,6	19,2	20,4	22,3	21,9	11,7	31,3	26,4	14,5	62,0	35,1	25,1	21,5	20,6	40,8	20,3	28,5

0,075	36,0	27,0	26,1	28,0	16,5	17,1	18,2	19,2	9,8	26,2	22,5	12,6	57,2	30,1	21,8	19,1	18,1	38,0	17,6	25,4
0,063	31,0	24,3	23,1	24,0	14,1	14,3	14,8	17,1	8,3	22,0	19,1	10,9	53,2	25,9	19,0	17,1	15,9	35,3	15,3	22,7
0,053	26,8	21,9	20,6	20,8	12,1	11,9	12,0	15,3	7,1	18,6	16,3	9,6	49,8	22,4	16,6	15,2	14,0	32,8	13,3	20,4
0,044	23,2	19,7	18,3	18,0	10,5	10,0	9,7	13,7	6,2	16,0	13,9	8,6	46,8	19,5	14,5	13,4	12,3	30,3	11,5	18,2
0,037	20,2	17,7	16,3	15,8	9,1	8,5	7,9	12,2	5,5	13,9	11,9	7,8	44,0	17,0	12,7	11,6	10,9	27,7	10,0	16,1
0,031	17,6	15,8	14,5	13,9	8,0	7,2	6,5	10,8	4,9	12,3	10,2	7,1	40,9	14,8	11,2	10,0	9,6	25,0	8,7	14,2
0,026	15,5	14,2	12,9	12,4	7,1	6,2	5,4	9,5	4,4	10,9	8,8	6,5	37,5	12,8	9,9	8,6	8,5	22,4	7,6	12,4
0,022	13,6	12,6	11,5	11,1	6,3	5,3	4,5	8,4	4,0	9,8	7,5	6,0	33,7	11,1	8,7	7,5	7,5	19,8	6,6	10,9
0,018	12,1	11,2	10,2	9,9	5,6	4,7	3,8	7,4	3,6	8,8	6,5	5,5	29,8	9,5	7,7	6,5	6,7	17,4	5,8	9,5
0,015	10,8	10,0	9,0	8,9	5,0	4,1	3,3	6,6	3,2	7,8	5,6	5,1	26,1	8,2	6,8	5,7	5,9	15,2	5,1	8,4
0,013	9,7	8,9	8,0	7,9	4,5	3,6	2,8	5,9	2,9	7,0	4,8	4,6	22,7	7,1	6,0	5,0	5,2	13,3	4,5	7,4
0,011	8,7	7,8	7,1	7,1	4,0	3,2	2,5	5,2	2,5	6,3	4,1	4,2	19,9	6,1	5,2	4,4	4,6	11,6	4,0	6,6
0,009	7,8	6,9	6,2	6,3	3,5	2,8	2,1	4,6	2,2	5,5	3,6	3,8	17,4	5,3	4,6	3,8	4,0	10,1	3,5	5,8
0,0078	6,9	6,0	5,4	5,5	3,1	2,4	1,8	4,1	2,0	4,9	3,0	3,4	15,2	4,6	4,0	3,3	3,5	8,7	3,0	5,0
0,0066	6,0	5,2	4,7	4,7	2,7	2,1	1,6	3,5	1,7	4,3	2,6	3,1	13,3	3,9	3,4	2,8	3,1	7,4	2,6	4,4
0,0055	5,2	4,5	4,0	4,1	2,3	1,8	1,4	3,0	1,5	3,7	2,2	2,7	11,5	3,3	2,9	2,4	2,6	6,2	2,2	3,7
0,0046	4,4	3,8	3,3	3,4	2,0	1,5	1,2	2,5	1,2	3,1	1,8	2,4	9,8	2,8	2,5	2,0	2,2	5,1	1,9	3,1
0,0039	3,7	3,2	2,8	2,9	1,6	1,3	1,0	2,1	1,0	2,6	1,5	2,0	8,2	2,3	2,0	1,6	1,9	4,2	1,6	2,6
0,0033	3,1	2,7	2,3	2,4	1,4	1,0	0,8	1,7	0,9	2,2	1,3	1,7	6,7	1,8	1,7	1,3	1,5	3,4	1,3	2,1
0,0027	2,5	2,2	1,8	1,9	1,1	0,8	0,7	1,4	0,7	1,8	1,0	1,5	5,4	1,5	1,4	1,1	1,3	2,6	1,1	1,7
0,0023	2,0	1,8	1,4	1,5	0,9	0,7	0,5	1,1	0,6	1,4	0,8	1,2	4,2	1,1	1,1	0,9	1,0	2,1	0,9	1,4
0,0019	1,6	1,5	1,1	1,2	0,7	0,5	0,4	0,8	0,4	1,1	0,7	1,0	3,2	0,9	0,9	0,7	0,8	1,6	0,7	1,1
0,0016	1,2	1,2	0,8	1,0	0,5	0,4	0,3	0,7	0,3	0,9	0,5	0,8	2,4	0,6	0,7	0,5	0,6	1,2	0,5	0,8
0,0013	0,9	0,9	0,6	0,7	0,4	0,3	0,3	0,5	0,2	0,7	0,4	0,6	1,8	0,5	0,5	0,4	0,5	0,9	0,4	0,6
0,0011	0,7	0,7	0,4	0,6	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3	0,5	1,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,3	0,4
0,00090	0,5	0,6	0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2	0,4	0,9	0,2	0,3	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3
0,00080	0,3	0,5	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,6	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4	0,1	0,2
0,00070	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1
0,00060	0,1	0,3	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,0	0,1

Tabela D.6. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras lavadas de areias recicladas da Fase 4 (% passante acumulada, em massa)

LCT / PMI – Certificados ímpares, 057/04 a 095/04 – Meio de dispersão: água deionizada

Diâmetro (mm)	S26 LU	S27 LU	S28 LU	S29 LU	S30 LU	S31 LU	S32 LU	S33 LU	S34 LU	S35 LU	S36 LU	S37 LU	S38 LU	S39 LU	S40 LU	S41 LU	S42 LU	S43 LU	S44 LU	S45 LU
3,47	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,92	100,0	100,0	100,0	99,9	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,45	100,0	100,0	100,0	99,7	98,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,06	99,8	100,0	100,0	99,1	97,6	100,0	99,9	100,0	99,9	99,9	100,0	100,0	99,6	100,0	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,73	98,6	99,6	100,0	97,7	95,7	99,8	99,4	99,6	99,6	99,8	99,2	99,6	99,2	99,8	98,5	99,9	99,8	100,0	99,9	99,9
1,45	95,4	97,2	98,4	95,3	93,0	98,0	97,8	97,5	97,8	98,3	99,4	97,5	97,3	98,6	95,7	98,9	98,9	99,7	98,8	98,1
1,22	89,9	92,6	94,2	91,5	89,0	94,3	94,7	93,3	93,9	94,7	91,5	93,2	92,7	95,8	91,2	96,1	96,6	98,2	96,1	94,0
1,03	82,3	85,8	87,3	86,3	83,6	88,5	90,1	86,8	87,9	88,8	84,4	86,3	85,3	91,4	85,3	91,3	92,7	95,3	91,7	87,5
0,86	72,8	77,0	78,0	79,9	76,7	80,9	84,0	78,5	79,7	80,9	75,7	77,3	75,7	85,7	78,5	84,8	87,3	90,9	85,8	79,1
0,72	62,0	66,9	66,8	72,5	68,9	71,9	76,5	69,2	69,8	71,3	66,0	66,8	64,6	79,0	71,3	77,0	80,5	85,2	78,8	69,5
0,61	50,9	56,6	54,8	64,6	60,9	62,2	67,7	59,7	58,9	60,9	56,3	56,0	53,5	71,4	64,3	68,4	72,7	78,4	71,3	59,8
0,51	40,3	46,6	43,5	56,2	53,2	52,4	58,0	50,5	47,9	50,8	47,3	45,6	43,1	63,1	57,2	59,6	64,0	70,7	63,4	50,5
0,42	30,6	37,1	33,0	47,3	45,6	43,0	47,9	41,8	37,6	41,3	38,8	35,9	33,7	54,1	49,8	50,4	54,7	62,1	55,2	41,9
0,36	22,2	28,3	23,7	38,4	38,4	34,2	38,2	33,8	28,4	32,7	30,9	27,2	25,6	44,9	42,1	41,4	45,2	52,9	46,9	34,1
0,30	15,3	20,6	16,0	29,8	31,8	26,3	29,1	26,7	20,7	25,3	23,9	19,8	18,8	35,8	34,4	32,9	36,2	43,7	38,8	27,2
0,25	9,9	14,1	10,0	22,2	25,9	19,7	21,0	20,5	14,5	19,2	17,8	13,9	13,3	27,2	27,2	25,2	27,9	35,0	31,3	21,3
0,21	6,1	9,1	5,8	16,0	21,0	14,4	14,5	15,4	9,8	14,6	12,9	9,5	9,1	19,8	20,8	14,7	20,8	27,3	24,6	16,4
0,18	3,7	5,7	3,0	11,5	17,0	10,6	9,8	11,4	6,7	11,1	9,2	6,4	6,2	13,9	15,6	13,6	15,2	20,9	19,0	12,6
0,15	2,3	3,7	1,5	8,4	13,7	8,1	6,7	8,6	4,7	8,8	6,7	4,4	4,3	9,6	11,7	9,9	10,9	16,0	14,6	9,9
0,12	1,7	2,7	0,7	6,6	11,1	6,5	4,8	6,7	3,4	7,2	5,0	3,2	3,2	6,8	9,0	7,4	8,0	12,5	11,4	7,9

0,10	1,3	2,3	0,3	5,5	9,0	5,4	3,7	5,5	2,7	6,1	4,0	2,5	2,6	5,0	7,1	5,7	6,0	10,0	9,1	6,5
0,089	1,2	2,1	0,2	4,9	7,3	4,8	3,0	4,7	2,2	5,3	3,4	2,1	2,2	3,9	5,9	4,6	4,6	8,4	7,4	5,5
0,075	1,0	2,0	0,2	4,5	5,9	4,4	2,6	4,1	1,8	4,7	2,9	1,8	1,9	3,2	5,1	3,8	3,7	7,2	6,3	4,8
0,063	0,9	2,0	0,1	4,2	4,9	4,0	2,4	3,7	1,6	4,3	2,6	1,6	1,7	2,8	4,5	3,2	3,0	6,4	5,4	4,2
0,053	0,9	1,9	0,1	4,0	4,1	3,8	2,2	3,4	1,4	3,9	2,4	1,4	1,5	2,5	4,1	2,8	2,5	5,7	4,8	3,7
0,044	0,8	1,8	0,1	3,8	3,6	3,5	2,0	3,2	1,3	3,6	2,2	1,3	1,4	2,2	3,8	2,5	2,2	5,2	4,3	3,4
0,037	0,8	1,6	0,1	3,7	3,2	3,3	1,9	3,0	1,2	3,3	2,0	1,2	1,3	2,1	3,5	2,3	1,9	4,8	4,0	3,2
0,031	0,7	1,5	0,0	3,5	2,9	3,1	1,8	2,8	1,1	3,1	1,9	1,2	1,2	1,9	3,4	2,1	1,8	4,5	3,7	3,0
0,026	0,7	1,4	0,0	3,4	2,7	2,9	1,7	2,7	1,1	2,9	1,8	1,1	1,2	1,8	3,2	2,0	1,7	4,2	3,5	2,9
0,022	0,7	1,3	0,0	3,3	2,5	2,8	1,6	2,5	1,0	2,7	1,7	1,1	1,1	1,6	3,1	1,9	1,5	3,9	3,3	2,7
0,018	0,6	1,3	0,0	3,1	2,3	2,6	1,4	2,3	0,9	2,5	1,6	1,1	1,0	1,5	2,9	1,8	1,4	3,6	3,1	2,6
0,015	0,6	1,2	0,0	3,0	2,2	2,4	1,3	2,2	0,9	2,4	1,5	1,0	1,0	1,4	2,8	1,7	1,3	3,3	2,9	2,4
0,013	0,5	1,1	0,0	2,8	2,0	2,2	1,2	2,0	0,8	2,2	1,4	0,9	0,9	1,3	2,6	1,5	1,2	3,0	2,6	2,2
0,011	0,5	1,1	0,0	2,6	1,8	2,0	1,1	1,8	0,7	2,0	1,3	0,9	0,8	1,2	2,4	1,4	1,1	2,8	2,4	2,1
0,0078	0,5	1,0	0,0	2,4	1,6	1,8	1,0	1,6	0,6	1,8	1,1	0,8	0,7	1,1	2,2	1,3	0,9	2,5	2,0	1,9
0,0066	0,4	0,9	0,0	2,2	1,5	1,6	0,9	1,5	0,6	1,6	1,0	0,7	0,7	1,0	2,0	1,1	0,9	2,2	1,8	1,7
0,0055	0,4	0,8	0,0	2,0	1,3	1,4	0,8	1,3	0,5	1,5	0,9	0,6	0,6	0,9	1,8	1,0	0,8	2,0	1,6	1,5
0,0046	0,3	0,7	0,0	1,8	1,1	1,2	0,7	1,1	0,4	1,3	0,8	0,5	0,5	0,8	1,6	0,9	0,6	1,7	1,4	1,4
0,0039	0,3	0,6	0,0	1,5	1,0	1,1	0,6	1,0	0,4	1,1	0,7	0,5	0,5	0,7	1,4	0,8	0,6	1,5	1,2	1,2
0,0033	0,3	0,6	0,0	1,3	0,9	0,9	0,5	0,8	0,3	1,0	0,6	0,4	0,4	0,6	1,2	0,7	0,5	1,3	1,0	1,0
0,0027	0,2	0,5	0,0	1,1	0,7	0,8	0,5	0,7	0,3	0,8	0,5	0,3	0,3	0,5	1,0	0,6	0,4	1,1	0,9	0,9
0,0023	0,2	0,4	0,0	0,9	0,6	0,6	0,4	0,6	0,2	0,7	0,4	0,3	0,3	0,4	0,8	0,5	0,4	0,9	0,7	0,8
0,0019	0,2	0,3	0,0	0,8	0,5	0,5	0,3	0,5	0,2	0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,7	0,4	0,3	0,7	0,6	0,6
0,0016	0,1	0,3	0,0	0,6	0,4	0,4	0,3	0,4	0,2	0,5	0,3	0,2	0,2	0,3	0,6	0,3	0,2	0,6	0,5	0,5
0,0013	0,1	0,2	0,0	0,5	0,3	0,4	0,2	0,3	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,4	0,4
0,0011	0,1	0,2	0,0	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1	0,4	0,3	0,3
0,00090	0,1	0,2	0,0	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3
0,00080	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
0,00070	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2

Tabela D.7. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras de areias recicladas lavadas da Fase 4 (% passante acumulada, em massa)

LCT / PMI – Certificados ímpares, 057/04 a 095/04 – Meio de dispersão: álcool isopropílico

Diâmetro (mm)	S26 LU	S27 LU	S28 LU	S29 LU	S31 LU	S33 LU	S34 LU	S35 LU	S36 LU	S37 LU	S40 LU	S41 LU	S42 LU	S43 LU	S45 LU
3,47	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,92	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,45	100,0	100,0	100,0	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0
2,06	99,9	100,0	100,0	99,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0
1,73	98,8	99,1	100,0	98,0	99,8	99,7	99,8	99,8	99,3	99,7	98,8	99,9	99,8	100,0	99,9
1,45	96,0	95,6	98,6	95,8	98,3	98,0	98,8	98,4	96,8	98,1	96,7	99,0	98,9	99,8	98,1
1,22	91,4	90,0	94,7	92,4	95,1	94,6	96,8	95,1	92,5	94,6	93,3	96,5	96,5	98,8	94,0
1,03	84,9	82,2	88,5	87,8	90,2	89,4	93,6	89,8	86,3	89,3	88,7	92,2	92,5	96,8	87,5
0,86	76,7	72,4	80,1	82,1	83,7	82,8	89,2	82,5	78,5	82,2	83,5	86,4	86,9	93,8	79,1
0,72	67,5	61,6	69,9	75,5	75,9	75,3	83,9	73,7	70,0	74,0	78,0	79,5	80,0	90,0	69,5
0,61	58,0	51,6	59,1	68,5	67,6	67,7	78,1	64,2	61,5	65,5	72,6	71,9	71,9	85,4	59,8
0,51	49,0	42,2	48,8	61,0	59,3	60,4	72,4	54,9	53,6	57,6	67,3	64,0	63,0	80,3	50,5
0,43	40,6	33,7	39,5	53,3	51,4	53,5	67,1	46,4	46,3	50,4	62,0	56,0	53,4	74,7	42,0
0,36	32,8	26,1	31,3	45,5	44,0	46,9	62,5	38,6	39,5	43,9	56,4	47,9	43,8	69,0	34,1
0,30	25,9	19,4	24,4	37,8	37,1	40,4	58,8	31,6	33,1	37,5	50,2	40,1	34,7	62,9	27,2
0,25	20,0	13,7	18,8	30,6	30,9	34,2	55,8	25,8	27,3	31,0	43,4	32,8	26,5	56,4	21,3
0,21	15,3	8,9	14,5	24,4	25,6	28,4	53,7	20,9	22,2	24,8	36,1	26,2	19,4	49,3	16,4
0,18	11,7	5,3	11,4	19,3	21,2	23,3	52,2	17,0	17,9	19,4	29,2	20,7	13,7	42,1	12,6
0,15	9,2	2,8	9,3	15,4	17,7	19,0	51,2	14,0	14,4	15,1	23,3	16,3	9,6	35,4	9,8
0,13	7,6	1,3	7,9	12,5	15,1	15,7	50,1	11,8	11,7	11,9	18,8	13,0	6,6	29,9	7,9
0,11	6,5	0,5	7,0	10,6	13,2	13,2	48,0	10,1	9,7	9,8	15,6	10,6	4,7	25,5	6,5
0,09	5,9	0,1	6,4	9,2	11,8	11,4	44,8	8,8	8,3	8,5	13,7	8,8	3,3	22,2	5,4

0,08	5,5	0,0	6,0	8,3	10,7	10,0	40,9	7,8	7,2	7,8	12,5	7,6	2,4	19,9	4,7
0,06	5,1	0,0	5,6	7,6	9,9	9,0	36,9	7,0	6,4	7,3	11,9	6,7	1,8	18,3	4,1
0,05	4,8	0,0	5,2	7,0	9,2	8,1	33,2	6,3	5,8	7,0	11,4	6,0	1,4	16,9	3,7
0,04	4,5	0,0	4,8	6,4	8,5	7,2	30,1	5,7	5,2	6,6	10,8	5,4	1,2	15,7	3,4
0,037	4,1	0,0	4,5	5,9	7,8	6,5	27,6	5,2	4,7	6,1	10,1	4,9	1,0	14,4	3,2
0,031	3,8	0,0	4,1	5,5	7,2	5,8	25,6	4,7	4,3	5,5	9,3	4,5	0,9	13,2	3,0
0,026	3,5	0,0	3,8	5,0	6,6	5,2	23,9	4,4	3,9	5,0	8,5	4,1	0,8	11,9	2,8
0,022	3,2	0,0	3,6	4,7	6,0	4,7	22,3	4,0	3,6	4,6	7,6	3,7	0,8	10,7	2,7
0,019	3,0	0,0	3,3	4,3	5,5	4,3	20,7	3,8	3,3	4,2	6,9	3,4	0,7	9,6	2,6
0,016	2,8	0,0	3,1	4,0	5,0	3,9	19,2	3,5	3,0	3,8	6,2	3,1	0,6	8,6	2,4
0,013	2,6	0,0	2,9	3,7	4,6	3,6	17,6	3,3	2,7	3,5	5,6	2,8	0,6	7,8	2,2
0,011	2,4	0,0	2,7	3,4	4,1	3,3	15,9	3,0	2,5	3,2	5,1	2,5	0,5	7,0	2,0
0,009	2,2	0,0	2,4	3,1	3,7	3,0	14,1	2,7	2,2	2,9	4,6	2,3	0,4	6,2	1,9
0,008	2,0	0,0	2,2	2,7	3,3	2,6	12,2	2,4	2,0	2,6	4,0	2,0	0,4	5,5	1,7
0,007	1,7	0,0	2,0	2,4	2,9	2,3	10,2	2,1	1,8	2,3	3,5	1,8	0,3	4,8	1,5
0,006	1,5	0,0	1,7	2,1	2,5	2,0	8,1	1,8	1,5	1,9	3,0	1,5	0,3	4,1	1,3
0,005	1,3	0,0	1,5	1,8	2,1	1,7	6,1	1,5	1,3	1,6	2,6	1,3	0,3	3,5	1,2
0,004	1,1	0,0	1,3	1,5	1,8	1,4	4,3	1,3	1,1	1,4	2,1	1,1	0,2	2,9	1,0
0,003	0,9	0,0	1,1	1,2	1,5	1,2	2,9	1,0	0,9	1,1	1,8	0,9	0,2	2,3	0,9
0,0028	0,8	0,0	0,9	1,0	1,2	0,9	1,8	0,8	0,8	0,9	1,4	0,7	0,2	1,9	0,8
0,0023	0,6	0,0	0,7	0,8	0,9	0,8	1,1	0,7	0,6	0,7	1,1	0,6	0,1	1,5	0,6
0,0019	0,5	0,0	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,9	0,4	0,1	1,2	0,5
0,0016	0,3	0,0	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,7	0,3	0,1	0,9	0,4
0,0014	0,2	0,0	0,3	0,3	0,4	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	0,1	0,7	0,4
0,0012	0,2	0,0	0,2	0,3	0,3	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,0	0,5	0,3
0,0010	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,4	0,2
0,0008	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,3	0,2
0,0007	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2
0,0006	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1

Tabela D.8. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras de areias recicladas lavadas da Fase 5 (% passante acumulada, em massa)

LCT / PMI – Certificados 793/05 a 804/05 – Meio de dispersão: água deionizada

Diâmetro (mm)	S46 LU	S49LU	S52 LU	S55 LU	S58 LU	S61 LU	S64 LU	S67 LU	S70 LU	S73 LU	S76 LU	S79 LU
3,473	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,918	98,3	97,1	96,8	98,4	99,0	99,3	99,2	99,4	99,7	99,6	99,7	98,5
2,452	94,6	91,5	89,9	95,1	96,9	97,7	97,5	97,9	99,0	98,9	98,9	95,2
2,060	90,3	83,7	82,0	90,7	94,0	95,1	95,0	95,9	97,9	98,0	97,7	90,9
1,730	85,5	74,6	73,8	85,5	90,4	91,5	92,0	93,2	96,2	96,6	96,0	85,9
1,454	80,1	64,9	65,8	79,7	86,0	86,8	88,2	89,6	93,8	94,6	93,6	80,4
1,221	74,1	55,0	58,1	73,2	80,6	81,2	83,5	85,2	90,2	91,4	90,1	74,4
1,026	67,6	45,8	50,8	66,1	74,4	74,6	77,9	79,6	85,3	87,0	85,5	67,9
0,862	60,9	37,4	43,8	58,4	67,6	67,5	71,4	73,1	79,2	81,6	79,8	61,0
0,724	54,1	30,0	37,3	50,6	60,5	60,0	64,2	65,7	71,9	75,3	73,0	54,0
0,608	47,5	23,7	31,3	43,0	53,4	52,7	56,7	57,8	63,6	68,3	65,4	46,9
0,511	41,0	18,3	25,7	35,6	46,2	45,5	48,9	49,6	54,7	60,5	57,3	39,7
0,429	34,6	13,6	20,3	28,6	39,0	38,4	40,9	41,1	45,4	52,0	48,6	32,6
0,361	28,4	9,8	15,5	22,2	31,9	31,5	33,2	32,7	36,2	43,1	39,9	25,8
0,303	22,5	7,0	11,3	16,5	25,2	24,9	26,0	24,9	27,6	34,2	31,5	19,8
0,255	17,0	5,1	7,9	11,8	19,0	19,0	19,6	17,9	20,1	25,8	23,7	14,7
0,214	12,2	3,8	5,3	8,2	13,7	14,1	14,3	12,3	14,0	18,5	17,2	10,6
0,180	8,4	3,1	3,7	5,6	9,6	10,3	10,2	8,2	9,4	12,8	12,1	7,6
0,151	5,7	2,8	2,7	4,0	6,7	7,7	7,3	5,5	6,4	8,8	8,5	5,6
0,127	3,8	2,6	2,1	3,0	4,8	6,0	5,4	3,9	4,6	6,1	6,2	4,4
0,107	2,6	2,5	1,8	2,4	3,5	4,9	4,3	3,0	3,5	4,5	4,7	3,6
0,090	1,9	2,4	1,5	2,1	2,7	4,3	3,6	2,5	2,8	3,5	3,7	3,0

0,075	1,5	2,2	1,3	1,9	2,2	3,9	3,1	2,2	2,3	2,9	3,1	2,6
0,063	1,3	2,1	1,1	1,7	1,9	3,5	2,8	1,9	2,0	2,5	1,9	2,3
0,053	1,1	2,0	1,0	1,6	1,7	3,3	2,6	1,7	1,8	2,2	1,8	2,1
0,045	1,0	1,8	0,9	1,5	1,5	3,1	2,4	1,6	1,7	2,0	1,6	1,9
0,037	1,0	1,7	0,8	1,4	1,4	2,9	2,3	1,5	1,5	1,8	1,5	1,8
0,031	0,9	1,7	0,8	1,3	1,3	2,7	2,2	1,5	1,5	1,7	1,5	1,7
0,026	0,9	1,6	0,7	1,3	1,2	2,6	2,1	1,4	1,4	1,6	1,4	1,6
0,022	0,8	1,6	0,7	1,2	1,1	2,5	2,0	1,3	1,3	1,5	1,3	1,5
0,019	0,8	1,5	0,6	1,2	1,1	2,3	1,9	1,3	1,2	1,4	1,2	1,4
0,016	0,7	1,3	0,6	1,1	1,0	2,2	1,7	1,2	1,2	1,3	1,1	1,3
0,013	0,7	1,2	0,5	1,0	0,9	2,0	1,6	1,1	1,1	1,2	1,0	1,2
0,011	0,6	1,1	0,4	0,9	0,8	1,9	1,5	1,0	1,0	1,1	0,9	1,1
0,009	0,6	1,0	0,4	0,8	0,8	1,7	1,3	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0
0,008	0,6	0,9	0,4	0,8	0,7	1,6	1,2	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9
0,007	0,5	0,8	0,3	0,7	0,7	1,4	1,1	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8
0,006	0,5	0,8	0,3	0,6	0,6	1,3	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
0,005	0,4	0,7	0,3	0,6	0,5	1,1	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
0,004	0,4	0,6	0,2	0,5	0,4	1,0	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,003	0,3	0,5	0,2	0,4	0,4	0,8	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5
0,0028	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	0,7	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0,0023	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
0,0019	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
0,0016	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,0014	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,0012	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,0010	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,0008	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0007	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0006	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela D.9. Resultados do ensaio de granulometria a laser das amostras de areias recicladas lavadas da Fase 5 (% passante acumulada, em massa)

LCT / PMI – Certificados 084/05 a 095/05 – Meio de dispersão: álcool isopropílico

Diâmetro (mm)	S46 LU	S49 LU	S52 LU	S55 LU	S58 LU	S61 LU	S64 LU	S67 LU	S70 LU	S73 LU	S76 LU	S79 LU
3,47	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2,90	98,48	97,51	97,16	98,59	99,18	99,34	99,28	99,43	99,76	99,66	99,74	98,68
2,42	95,10	92,52	91,22	95,62	97,47	97,77	97,79	98,18	99,12	98,99	99,12	95,85
2,02	91,29	85,79	84,42	91,74	95,11	95,26	95,69	96,39	98,12	98,15	98,11	92,15
1,69	86,99	77,91	77,44	87,19	92,16	91,78	93,04	94,00	96,68	96,92	96,70	87,90
1,41	82,11	69,50	70,63	82,03	88,53	87,33	89,70	90,86	94,44	94,96	94,62	83,16
1,17	76,68	61,11	64,12	76,29	84,16	81,90	85,58	86,85	91,19	91,95	91,68	77,97
0,98	70,85	53,40	57,94	69,98	79,11	75,64	80,65	81,90	86,79	87,85	87,81	72,39
0,82	64,85	46,46	52,12	63,24	73,61	68,87	74,99	76,11	81,29	82,82	83,02	66,54
0,68	58,88	40,42	46,72	56,46	67,94	61,96	68,81	69,67	74,81	77,04	77,41	60,57
0,57	53,10	35,39	41,78	49,94	62,29	55,22	62,35	62,86	67,60	70,66	71,21	54,57
0,48	47,44	31,16	37,08	43,70	56,72	48,65	55,78	55,79	59,99	63,64	64,64	48,59
0,40	41,81	27,63	32,56	37,83	51,21	42,21	49,19	48,65	52,23	56,08	57,88	42,71
0,33	36,20	24,75	28,41	32,47	45,76	36,03	42,70	41,66	44,62	48,27	51,15	37,13
0,28	30,70	22,41	24,67	27,75	40,41	30,29	36,47	35,03	37,42	40,52	44,68	31,98
0,23	25,45	20,54	21,46	23,82	35,30	25,21	30,58	29,15	30,93	33,28	38,72	27,41
0,19	20,69	19,13	18,92	20,74	30,57	21,02	25,30	24,34	25,46	27,06	33,58	23,57
0,16	16,64	18,13	17,06	18,44	26,35	17,77	20,94	20,70	21,19	22,21	29,43	20,52
0,13	13,37	17,42	15,71	16,79	22,74	15,36	17,56	18,12	18,07	18,63	26,21	18,14
0,11	10,87	16,84	14,67	15,59	19,74	13,60	15,09	16,35	15,85	16,10	23,73	16,31
0,09	9,02	16,28	13,77	14,66	17,30	12,26	13,31	15,12	14,29	14,34	21,71	14,86
0,08	7,67	15,71	12,94	13,84	15,30	11,19	12,03	14,14	13,13	13,05	19,90	13,64

0,07	6,67	15,09	12,13	13,04	13,60	10,25	11,03	13,23	12,19	12,01	18,12	12,55
0,054	5,91	14,44	11,33	12,21	12,10	9,38	10,19	12,29	11,34	11,09	16,33	11,50
0,045	5,30	13,73	10,52	11,35	10,72	8,57	9,43	11,29	10,51	10,23	14,55	10,47
0,038	4,77	12,93	9,68	10,45	9,43	7,78	8,66	10,24	9,63	9,38	12,79	9,46
0,032	4,29	11,99	8,80	9,52	8,23	7,01	7,88	9,14	8,70	8,50	11,09	8,45
0,026	3,82	10,89	7,85	8,56	7,12	6,23	7,04	8,01	7,71	7,60	9,47	7,42
0,022	3,34	9,63	6,81	7,57	6,09	5,43	6,16	6,87	6,68	6,64	7,96	6,37
0,018	2,84	8,24	5,72	6,55	5,13	4,60	5,23	5,72	5,63	5,66	6,57	5,32
0,015	2,35	6,78	4,61	5,51	4,23	3,75	4,28	4,62	4,60	4,66	5,31	4,29
0,013	1,86	5,32	3,54	4,47	3,38	2,92	3,36	3,61	3,61	3,69	4,16	3,33
0,011	1,39	3,95	2,56	3,47	2,60	2,14	2,50	2,70	2,69	2,77	3,13	2,46
0,009	0,98	2,76	1,74	2,56	1,91	1,46	1,75	1,92	1,88	1,96	2,24	1,73
0,007	0,64	1,82	1,10	1,76	1,31	0,90	1,14	1,30	1,23	1,29	1,52	1,16
0,006	0,39	1,13	0,66	1,13	0,84	0,51	0,70	0,85	0,77	0,81	0,99	0,75
0,005	0,22	0,69	0,38	0,68	0,49	0,26	0,42	0,54	0,47	0,50	0,63	0,47
0,0043	0,11	0,43	0,22	0,38	0,26	0,12	0,25	0,35	0,30	0,32	0,41	0,30
0,0036	0,05	0,28	0,14	0,21	0,12	0,05	0,16	0,25	0,21	0,22	0,28	0,21
0,0030	0,02	0,22	0,10	0,12	0,05	0,02	0,12	0,19	0,17	0,17	0,22	0,16
0,0025	0,01	0,19	0,08	0,08	0,02	0,00	0,11	0,16	0,15	0,15	0,19	0,13
0,0021	0,00	0,18	0,08	0,06	0,00	0,00	0,10	0,15	0,14	0,14	0,18	0,12
0,0018	0,00	0,16	0,07	0,05	0,00	0,00	0,09	0,14	0,13	0,13	0,17	0,11
0,0015	0,00	0,17	0,07	0,05	0,00	0,00	0,10	0,14	0,14	0,14	0,18	0,11
0,0012	0,00	0,14	0,06	0,05	0,00	0,00	0,08	0,13	0,11	0,12	0,15	0,09
0,0010	0,00	0,12	0,05	0,04	0,00	0,00	0,07	0,11	0,09	0,10	0,13	0,08
0,0009	0,00	0,08	0,04	0,03	0,00	0,00	0,05	0,08	0,07	0,07	0,09	0,05
0,0007	0,00	0,05	0,02	0,02	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03
0,0006	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01

Anexo E. Resultados da caracterização no estado fresco das argamassas produzidas com amostras de areias recicladas, lavadas e não lavadas, obtidas na usina de reciclagem de Socorro/SP

Tabela E.1. Resultados da caracterização no estado fresco das argamassas produzidas com as amostras de areias recicladas não lavadas: Fases 1 e 4

Amostra	H total (%)	a/c total	Consistência (mm)	Densidade de massa fresca (kg/m ³)	Teor de ar aprisionado (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)
S1 NL	30	2,7	269	1860	3,6	166
S2 NL	31	2,8	268	1890	1,6	165
S3 NL	25	2,3	277	1840	8,1	162
S4 NL	27	2,4	271	1840	7,2	160
S5 NL	25	2,3	290	1770	11,5	158
S6 NL	25	2,2	277	1780	11,1	159
S7 NL	26	2,3	261	1840	7,8	157
S8 NL	26	2,4	269	1820	8,5	160
S9 NL	25	2,2	260	1800	10,9	160
S10 NL	27	2,4	267	1770	10,9	155
S11 NL	25	2,2	282	1820	10,1	161
S12 NL	25	2,2	277	1830	9,5	163
S13 NL	27	2,4	267	1840	6,9	161
S14 NL	27	2,4	266	1810	9,3	158
S15 NL	25	2,3	285	1730	12,1	153
S16 NL	27	2,5	266	1690	14,6	146
S17 NL	29	2,6	286	1840	6,0	157
S18 NL	27	2,4	260	1840	4,9	161
S19 NL	29	2,6	281	1790	7,2	155
S21 NL	28	2,5	267	-	-	-
S22 NL	28	2,5	260	-	-	-
S23 NL	-	-	-	-	-	-
S24 NL	-	-	-	-	-	-
S25 NL	-	-	-	-	-	-
S26 NL	28	2,5	318	1780	-	155
S27 NL	28	2,5	282	1902	-	165
S28 NL	28	2,5	317	1860	5,67	162
S29 NL	28	2,5	299	1826	-	159
S30 NL	28	2,5	289	1750	11,34	152
S31 NL	28	2,5	291	1849	-	161
S32 NL	28	2,5	321	1866	-	162
S33 NL	28	2,5	269	1835	-	160
S34 NL	28	2,5	306	1678	13,69	146
S35 NL	28	2,5	311	1784	9,51	155

S36 NL	28	2,5	297	1842	-	160
S37 NL	28	2,5	295	1755	-	153
S38 NL	28	2,5	294	1762	10,21	153
S39 NL	28	2,5	278	1851	-	161
S40 NL	28	2,5	260	1892	-	165
S41 NL	28	2,5	246	1874	-	163
S42 NL	28	2,5	243	1845	6,42	160
S43 NL	28	2,5	295	1868	-	162
S44 NL	28	2,5	304	1826	-	159
S45 NL	28	2,5	280	1855	-	161

Tabela E.2. Resultados da caracterização no estado fresco das argamassas produzidas com as amostras de areia recicladas lavadas em laboratório (LL) e na usina (LU), obtidas em Socorro/SP: Fases 3, 4 e 5

Amostras lavadas	H total (%)	H efetivo (%)	Consistência (mm)	a/c total	a/c efetivo	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar aprisionado (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)
S1 LL	24,75	-	290	2,47	-	1752	-	140
S2 LL	25,12	-	281	2,51	-	1769	-	141
S3 LL	25,57	-	288	2,56	-	1811	-	144
S4 LL	26,85	-	298	2,69	-	1806	-	142
S5 LL	25,15	-	284	2,51	-	1801	-	144
S6 LL	24,50	-	312	2,45	-	1831	-	147
S7 LL	23,09	-	286	2,31	-	1817	-	148
S8 LL	23,74	-	285	2,37	-	1808	-	146
S9 LL	24,34	-	284	2,43	-	1822	-	147
S10 LL	23,83	-	286	2,38	-	1805	-	146
S11 LL	23,68	-	281	2,37	-	1823	-	147
S12 LL	22,66	-	283	2,27	-	1845	-	150
S13 LL	23,36	-	283	2,34	-	1827	-	148
S14 LL	26,00	-	288	2,60	-	1810	-	144
S15 LL	24,74	-	298	2,47	-	1822	-	146
S16 LL	24,57	-	289	2,46	-	1823	-	146
S18 LL	24,41	-	287	2,44	-	1810	-	146
S19 LL	25,69	-	294	2,57	-	1822	-	145
S21 LL	23,98	-	297	2,40	-	1807	-	146
S22 LL	22,59	-	290	2,26	-	1833	-	150
S23 LL	-	-	-	-	-	-	-	-
S24 LL	-	-	-	-	-	-	-	-
S25 LL	-	-	-	-	-	-	-	-
S26 LU	26,0	24,2	274	2,6	2,42	1769	11,94	142
S27 LU	26,0	24,8	303	2,6	2,48	1755	12,67	141
S28 LU	26,0	24,7	296	2,6	2,47	1857	6,76	149
S29 LU	26,0	24,8	290	2,6	2,48	1869	6,46	150
S30 LU	26,0	24,7	274	2,6	2,47	1761	10,99	141
S31 LU	26,0	24,9	249	2,6	2,49	1797	10,34	144
S32 LU	26,0	25,0	318	2,6	2,50	1813	9,17	145
S33 LU	26,0	24,9	286	2,6	2,49	1784	10,56	143
S34 LU	26,0	24,4	283	2,6	2,44	1765	10,45	142
S35 LU	26,0	24,2	246	2,6	2,42	1739	12,21	140
S36 LU	26,0	24,9	271	2,6	2,49	1790	10,09	143
S37 LU	26,0	24,5	261	2,6	2,45	1723	13,02	138
S38 LU	26,0	23,5	192	2,6	2,35	1738	12,97	141
S39 LU	26,0	23,4	211	2,6	2,34	1778	11,08	144
S40 LU	26,0	24,5	261	2,6	2,45	1834	7,56	147
S41 LU	26,0	23,9	250	2,6	2,39	1766	10,71	143

S42 LU	26,0	23,8	238	2,6	2,38	1748	12,08	141
S43 LU	26,0	24,1	265	2,6	2,41	1799	9,35	145
S44 LU	26,0	24,9	268	2,6	2,49	1806	8,93	145
S45 LU	26,0	24,2	259	2,6	2,42	1813	8,16	146
S46 LU	26,0	22,4	290	2,6	2,24	1825	8,3	145
S47 LU	26,0	22,7	296	2,6	2,27	1805	-	143
S48 LU	26,0	22,4	297	2,6	2,24	1788	-	142
S49 LU	26,0	20,7	306	2,6	2,07	1943	2,6	154
S50 LU	26,0	20,3	305	2,6	2,03	1939	-	154
S51 LU	26,0	21,1	306	2,6	2,11	1918	-	152
S52 LU	26,0	21,3	325	2,6	2,13	1817	8,9	144
S53 LU	26,0	21,1	329	2,6	2,11	1782	-	141
S54 LU	26,0	21,7	333	2,6	2,17	1751	-	139
S55 LU	26,0	21,6	323	2,6	2,16	1892	4,6	150
S56 LU	26,0	21,4	325	2,6	2,14	1896	-	151
S57 LU	26,0	22,0	318	2,6	2,20	1895	-	150
S58 LU	26,0	22,0	316	2,6	2,20	1867	5,7	148
S59 LU	26,0	21,8	326	2,6	2,18	1876	-	149
S60 LU	26,0	21,2	317	2,6	2,12	1854	-	147
S61 LU	26,0	21,1	328	2,6	2,11	1768	10,9	140
S62 LU	26,0	21,9	328	2,6	2,19	1778	-	141
S63 LU	26,0	21,7	333	2,6	2,17	1821	-	145
S64 LU	26,0	21,2	305	2,6	2,12	1900	4,1	151
S65 LU	26,0	21,4	311	2,6	2,14	1907	-	151
S66 LU	26,0	21,3	311	2,6	2,13	1897	-	151
S67 LU	26,0	21,9	345	2,6	2,19	1745	12,3	138
S68 LU	26,0	21,6	348	2,6	2,16	1737	-	138
S69 LU	26,0	21,5	343	2,6	2,15	1716	-	136
S70 LU	26,0	20,3	280	2,6	2,03	1862	6,1	148
S71 LU	26,0	19,9	276	2,6	1,99	1869	-	148
S72 LU	26,0	19,2	274	2,6	1,92	1867	-	148
S73 LU	26,0	21,0	312	2,6	2,10	1900	4,0	151
S74 LU	26,0	20,6	315	2,6	2,06	1901	-	151
S75 LU	26,0	20,3	308	2,6	2,03	1890	-	150
S76 LU	26,0	21,2	307	2,6	2,12	1831	7,1	145
S77 LU	26,0	21,7	318	2,6	2,17	1849	-	147
S78 LU	26,0	21,6	315	2,6	2,16	1849	-	147
S79 LU	26,0	22,0	325	2,6	2,20	1931	2,6	153
S80 LU	26,0	21,5	328	2,6	2,15	1899	-	151
S81 LU	26,0	21,5	329	2,6	2,15	1940	-	154

Tabela E.3. Resultado das cinco caracterizações de consistência e densidade de massa das argamassas produzidas com as amostras de areias recicladas lavadas, na Fase 4, obtidas em Socorro/SP

Amostra	Consistência média (mm)					Média (mm)	Amplitude (mm)	Desvio-padrão (mm)
	269	271	285	275	269			
S26 LU	269	271	285	275	269	274	16	7
S27 LU	299	299	321	294	303	303	27	10
S28 LU	290	300	300	298	295	296	10	4
S29 LU	289	298	288	288	288	290	10	4
S30 LU	270	281	280	271	269	274	12	6
S31 LU	248	252	248	251	247	249	4	2
S32 LU	321	315	307	326	322	318	19	7
S33 LU	286	290	290	280	285	286	10	4
S34 LU	289	281	281	282	282	283	8	3
S35 LU	247	245	244	250	243	246	7	3
S36 LU	279	267	267	271	272	271	13	5
S37 LU	269	259	254	267	255	261	15	7
S38 LU	213	178	178	190	200	192	35	15
S39 LU	212	214	203	206	220	211	17	7
S40 LU	278	256	254	257	261	261	24	10
S41 LU	249	248	257	239	256	250	18	7
S42 LU	243	239	235	225	250	238	25	9
S43 LU	262	277	261	257	267	265	20	8
S44 LU	265	265	271	270	267	268	6	3
S45 LU	258	255	258	256	270	259	15	6
Média:						265	16	6,4

Amostra	Densidade fresca média (kg/m ³)					Média (kg/m ³)	Amplitude (kg/m ³)	Desvio-padrão (kg/m ³)
	1759	1796	1771	1759	1759			
S26 LU	1759	1796	1771	1759	1759	1769	38	16
S27 LU	1739	1763	1755	1759	1759	1755	24	9
S28 LU	1838	1888	1888	1838	1833	1857	55	28
S29 LU	1885	1861	1864	1867	1869	1869	24	9
S46 LU	1791	1768	1738	1754	1754	1761	54	20
S31 LU	1793	1791	1796	1796	1810	1797	19	8
S32 LU	1803	1807	1831	1817	1807	1813	27	11
S33 LU	1797	1778	1778	1783	1782	1784	19	8
S34 LU	1788	1772	1738	1792	1738	1765	54	26
S35 LU	1741	1736	1745	1733	1740	1739	12	5
S36 LU	1795	1777	1792	1792	1795	1790	18	7
S37 LU	1723	1734	1738	1710	1710	1723	28	13
S38 LU	1728	1728	1759	1736	1736	1738	31	13
S39 LU	1783	1776	1771	1781	1780	1778	12	5
S40 LU	1822	1823	1832	1845	1848	1834	27	12
S41 LU	1761	1775	1766	1779	1751	1766	27	11
S42 LU	1764	1745	1768	1705	1758	1748	63	26
S43 LU	1808	1787	1781	1818	1802	1799	37	15
S44 LU	1807	1798	1808	1817	1802	1806	19	7
S45 LU	1807	1806	1822	1829	1804	1813	25	11
Média:						1723	31	13

Anexo F. Resultados dos ensaios de resistência mecânica dos corpos-de-prova de argamassa

Tabela F.1. Resistência mecânica aos 28 dias dos corpos-de-prova prismáticos de argamassas (EN 1015-11/93), produzidas na proporção 1:8 com cimento CP III 40 RS e 10 composições de agregados reciclados selecionados na Fase 1.

Composição	Tração na flexão (MPa)			Compressão (MPa)		
	1	2	3	1	2	3
T1	0,06	0,10	-	0,54	0,50	-
T2	0,15	0,15	0,21	1,15	1,23	1,06
T3	0,33	0,40	0,35	2,08	2,16	2,00
T4	0,52	0,57	-	2,76	2,82	2,94
T5	0,72	0,75	0,77	4,05	4,33	4,17
T6	0,83	0,84	0,89	4,65	5,06	4,45
T7	0,72	0,83	0,90	3,94	3,96	3,98
T8	1,39	1,74	1,95	6,57	6,80	-
T9	1,51	1,68	1,97	7,04	6,71	7,11
T10	0,92	1,05	1,10	5,41	5,61	5,74

Tabela F.2. Resistência mecânica aos 28 dias dos corpos-de-prova prismáticos de argamassas (EN 1015-11/93), produzidas na proporção 1:1:8 com cimento CP III 40 RS, cal CH III e 10 composições de agregados reciclados selecionados, passantes na peneira 1,2 mm e lavados na peneira de 0,15 mm, na Fase 3

Composição	Tração na flexão (MPa)			Compressão (MPa)		
	1	2	3	1	2	3
T1 LL	0,98	1,19	1,20	7,25	6,64	6,36
T2 LL	1,09	1,10	1,00	5,99	6,39	6,37
T3 LL	1,28	1,43	1,00	6,40	7,38	8,03
T4 LL	1,85	1,93	1,89	9,93	9,60	9,86
T5 LL	0,76	1,15	1,31	6,66	6,08	7,01
T6 LL	1,36	1,19	1,18	7,43	7,44	7,83
T7 LL	1,11	1,14	1,04	6,13	6,28	6,31
T8 LL	0,81	0,94	0,78	4,76	4,45	4,43
T9 LL	1,18	1,50	1,25	5,30	5,62	4,86
T10 LL	0,79	0,96	1,05	5,35	5,19	5,14

Tabela F.3. Resistência mecânica aos 28 dias dos corpos-de-prova prismáticos de argamassas (EN 1015-11/93), produzidas na proporção 1:8 com cimento CP III 40 RS e 10 composições de agregados reciclados selecionados com granulometria controlada conforme a norma DTU 26.1, na Fase 2

Composição	Tração na flexão (MPa)			Compressão (MPa)		
	1	2	3	1	2	3
T1g	0,04	0,04	-	0,46	0,50	0,44
T2g	0,22	0,26	0,20	1,42	1,75	1,48
T3g	0,37	0,30	0,27	2,09	2,08	2,19
T4g	0,38	0,44	0,36	2,43	2,07	2,23
T5g	0,38	0,33	0,41	2,38	1,89	2,15
T6g	0,44	0,38	-	2,09	1,82	1,38
T7g	0,40	0,48	0,36	2,83	2,44	2,51
T8g	0,79	0,84	0,87	3,44	3,30	3,32
T9g	1,43	1,45	-	4,90	5,13	5,96
T10g	0,34	0,91	1,01	3,75	4,04	3,56

Tabela F.4. Resistência mecânica aos 28 dias dos corpos-de-prova prismáticos de argamassas (EN 1015-11/93), produzidas na proporção 1:8 com cimento CP III 40 RS (S1 NL a S25 NL) ou cimento CP III 32 RS (S26 NL a S45 NL) e amostras de areias recicladas não lavadas, nas Fases 1 e 3

Amostra	Tração na flexão (MPa)			Compressão (MPa)		
	1	2	3	1	2	3
S1 NL	0,85	0,71	0,81	3,80	3,75	4,00
S2 NL	0,89	0,82	0,96	3,94	4,18	4,25
S3 NL	0,86	0,78	-	4,61	4,83	4,37
S4 NL	1,04	0,80	0,81	4,49	4,23	4,89
S5 NL	1,00	0,87	0,80	4,38	4,45	4,71
S6 NL	1,00	1,11	0,92	4,37	4,68	4,34
S7 NL	1,23	0,97	1,05	5,02	4,49	4,68
S8 NL	1,27	1,28	1,15	5,02	4,72	4,86
S9 NL	0,97	1,29	1,17	5,02	5,26	4,73
S10 NL	0,92	1,07	1,03	4,23	4,85	4,52
S11 NL	0,75	0,84	0,87	4,86	4,57	4,64
S12 NL	0,95	1,14	1,07	5,76	5,40	5,45
S13 NL	0,90	1,02	0,98	4,22	4,25	4,22
S14 NL	1,32	1,15	1,28	4,88	4,49	4,72

S15 NL	0,80	1,05	1,10	4,84	5,09	4,19
S16 NL	0,84	0,75	0,98	4,53	4,51	4,53
S17 NL	1,12	1,15	0,78	5,16	4,96	5,10
S18 NL	1,29	1,04	1,20	5,41	5,57	5,36
S19 NL	0,83	0,86	0,95	4,92	3,76	4,38
S21 NL	1,14	1,18	1,05	5,01	5,21	5,31
S22 NL	0,85	0,71	0,81	3,80	3,75	4,00
S23 NL	-	-	-	-	-	-
S24 NL	-	-	-	-	-	-
S25 NL	-	-	-	-	-	-
S26 NL	0,56	0,63	0,63	2,68	2,50	2,57
S27 NL	0,61	0,65	0,69	3,42	3,36	3,59
S28 NL	0,75	0,63	0,63	3,61	2,94	3,04
S29 NL	0,89	0,85	0,82	4,19	3,76	3,91
S30 NL	0,21	0,26	0,38	1,39	1,34	1,45
S31 NL	0,94	0,81	0,75	4,45	4,28	4,23
S32 NL	0,60	0,75	0,65	2,76	3,20	2,99
S33 NL	0,73	0,96	0,86	3,76	3,72	3,40
S34 NL	0,83	0,82	0,73	3,31	3,36	2,99
S35 NL	0,61	0,66	0,57	2,87	3,07	2,84
S36 NL	0,49	0,55	0,61	2,84	2,96	2,65
S37 NL	0,75	0,76	0,88	3,95	4,14	4,25
S38 NL	0,35	0,34	0,32	1,51	1,39	1,29
S39 NL	0,30	0,66	0,69	2,49	3,12	3,00
S40 NL	0,33	0,35	0,38	1,67	1,74	1,73
S41 NL	0,81	0,71	-	4,37	4,24	4,29
S42 NL	0,52	0,48	0,48	2,61	2,77	2,66
S43 NL	0,67	0,64	0,64	3,17	3,34	3,19
S44 NL	0,54	0,45	0,49	2,60	2,72	2,72
S45 NL	0,67	0,58	0,68	3,36	3,26	3,23

Tabela F.5. Resistência mecânica aos 28 dias dos corpos-de-prova prismáticos de argamassas (EN 1015-11/93), produzidas na proporção 1:1:8 com cimento CP III 40 RS, cal CHIII e amostras de areias recicladas, passantes na peneira de 1,2 mm e lavadas na peneira de 0,15 mm, na usina de Socorro/SP, na Fase 3 da pesquisa

Amostra	Tração (MPa)						Compressão (MPa)					
	M1	M2	M3	Média	Amplitude	Desvio-padrão	M1	M2	M3	Média	Amplitude	Desvio-padrão
S1 LL	0,79	0,78	0,58	0,72	0,20	0,12	3,85	3,56	3,33	3,58	0,52	0,26
S2 LL	0,89	0,84	0,95	0,89	0,11	0,06	4,12	3,96	3,47	3,85	0,65	0,34
S3 LL	0,82	0,97	0,67	0,82	0,30	0,15	4,60	4,33	4,87	4,60	0,54	0,27
S4 LL	0,88	0,95	0,66	0,83	0,29	0,15	4,54	4,42	2,72	3,89	1,82	1,02
S5 LL	0,89	0,70	0,59	0,72	0,30	0,15	4,52	4,27	3,48	4,09	1,03	0,54
S6 LL	1,01	1,21	0,80	1,01	0,41	0,21	4,47	4,10	4,81	4,46	0,71	0,36
S7 LL	1,08	1,19	0,96	1,08	0,23	0,12	4,73	4,25	5,20	4,73	0,95	0,48
S8 LL	1,23	0,55	0,62	0,80	0,68	0,38	4,87	5,21	3,28	4,45	1,93	1,03
S9 LL	1,14	0,89	0,73	0,92	0,42	0,21	5,00	4,41	4,36	4,59	0,64	0,36
S10 LL	1,00	0,66	0,81	0,83	0,34	0,17	4,53	4,26	4,95	4,58	0,70	0,35
S11 LL	0,82	0,71	0,41	0,65	0,41	0,21	4,69	5,60	5,56	5,29	0,91	0,52
S12 LL	1,05	0,70	0,69	0,82	0,36	0,21	5,53	5,19	5,19	5,30	0,35	0,20
S13 LL	0,97	0,74	0,83	0,85	0,22	0,11	4,23	4,85	4,97	4,68	0,74	0,40
S14 LL	1,25	1,05	1,45	1,25	0,40	0,20	4,69	4,20	5,20	4,70	1,00	0,50
S15 LL	0,98	1,20	0,81	1,00	0,39	0,20	4,70	5,18	4,23	4,70	0,95	0,48
S16 LL	0,86	0,70	0,76	0,77	0,16	0,08	4,52	4,05	4,24	4,27	0,47	0,24
S18 LL	1,02	1,28	0,72	1,01	0,56	0,28	5,07	5,43	4,71	5,07	0,72	0,36
S19 LL	1,18	0,75	0,77	0,90	0,43	0,24	5,45	4,93	5,10	5,16	0,52	0,26
S21 LL	0,88	1,08	0,99	0,98	0,20	0,10	4,35	4,92	4,54	4,60	0,56	0,29
S22 LL	1,12	1,00	0,87	1,00	0,25	0,13	5,18	4,67	4,96	4,93	0,51	0,26
S24 LL	0,80	0,92	0,94	0,89	0,14	0,08	5,02	5,59	5,23	5,28	0,57	0,29

S25 LL	0,63	0,69	1,10	0,81	0,47	0,25	4,50	4,80	5,52	4,94	1,02	0,52
Média final:				0,89	0,33	0,172				4,63	0,81	0,423

Tabela F.6. Resistência mecânica aos 28 dias dos corpos-de-prova prismáticos de argamassas (EN 1015-11/93), produzidas na proporção 1:1:8 com cimento CP III 32 RS, cal CHIII e amostras de areias recicladas passantes na peneira de 1,2 mm e lavadas em laboratório na peneira de 0,15 mm, na usina de Socorro/SP, na Fase 4 da pesquisa

Amostra	Tração (MPa)				Média	Amplitude	Desvio-padrão	Compressão (MPa)				Média	Amplitude	Desvio-padrão
	M1	M2	M3	M4				M1	M2	M3	M4			
S26 LU	0,94	1,45	0,97	0,93	1,07	0,52	0,25	5,75	4,88	5,70	5,94	5,57	1,06	0,47
S27 LU	0,67	0,86	0,64	0,77	0,74	0,22	0,10	4,45	4,27	4,90	3,75	4,34	1,15	0,48
S28 LU	0,44	0,76	0,68	0,75	0,66	0,33	0,15	4,13	4,96	5,59	5,22	4,97	1,46	0,62
S29 LU	0,77	0,79	0,57	1,00	0,78	0,43	0,17	5,92	6,49	6,53	6,35	6,32	0,60	0,28
S30 LU	0,86	1,04	1,26	1,30	1,11	0,45	0,21	6,41	5,27	6,83	5,93	6,11	1,56	0,67
S31 LU	1,49	1,45	1,74	1,60	1,57	0,30	0,13	7,19	7,34	7,41	6,89	7,21	0,52	0,23
S32 LU	1,16	1,39	1,40	0,77	1,18	0,63	0,30	5,29	4,97	5,32	5,31	5,22	0,35	0,17
S33 LU	0,86	1,01	1,09	1,05	1,00	0,23	0,10	6,65	6,72	6,47	6,38	6,56	0,34	0,16
S34 LU	0,80	1,04	0,73	0,82	0,85	0,31	0,14	4,26	4,18	4,42	4,38	4,31	0,23	0,11
S35 LU	1,02	1,04	1,22	1,06	1,09	0,20	0,09	6,75	6,65	7,54	6,52	6,86	1,03	0,46
S36 LU	0,75	1,00	0,78	1,10	0,91	0,34	0,17	5,10	5,73	5,30	5,70	5,46	0,63	0,31
S37 LU	0,67	0,95	0,95	1,02	0,90	0,35	0,15	4,27	4,05	4,50	4,25	4,27	0,45	0,18
S38 LU	1,13	0,86	1,20	1,76	1,23	0,90	0,38	6,30	6,23	6,84	7,97	6,83	1,73	0,80
S39 LU	1,01	1,55	1,55	1,69	1,45	0,68	0,30	5,35	6,99	5,16	7,82	6,33	2,66	1,29
S40 LU	1,21	1,14	1,05	1,30	1,17	0,25	0,11	7,81	6,93	7,20	7,09	7,26	0,88	0,39
S41 LU	0,88	0,80	1,43	1,07	1,04	0,63	0,28	6,08	5,81	6,21	6,04	6,04	0,39	0,16
S42 LU	0,81	1,16	0,70	1,11	0,95	0,45	0,22	5,92	5,50	5,37	5,13	5,48	0,78	0,33
S43 LU	0,96	1,06	0,90	1,02	0,99	0,16	0,07	6,26	6,22	5,67	6,14	6,07	0,59	0,27
S44 LU	1,24	1,56	0,96	1,06	1,20	0,60	0,26	6,70	6,75	7,56	7,08	7,02	0,87	0,40
S45 LU	0,92	1,06	1,03	0,86	0,97	0,21	0,10	7,35	6,69	7,06	7,18	7,07	0,66	0,28
Média final:					1,04	0,41	0,184					5,97	0,90	0,402

Tabela F.7. Resistência mecânica aos 28 dias dos corpos-de-prova prismáticos de argamassas (EN 1015-11/93), produzidas na proporção 1:1:8 com cimento CP III 32 RS, cal CH III e amostras de areias recicladas passantes na peneira de 2,4 mm e lavadas em classificador espiral, obtidas na usina de Socorro/SP, na Fase 5 da pesquisa

Amostra	Tração na flexão (MPa)			Compressão (MPa)		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
S46 LU	1,08	0,95	1,07	5,58	-	5,60
S47 LU	1,05	1,04	1,06	4,50	4,26	4,42
S48 LU	-	1,04	0,92	4,17	4,51	4,24
S49 LU	0,65	0,59	-	6,92	6,62	6,37
S50 LU	-	0,91	0,93	5,76	5,25	6,12
S51 LU	1,06	0,93	-	6,00	5,91	5,93
S52 LU	0,52	-	0,54	3,24	-	3,38
S53 LU	0,42	0,37	-	3,58	3,29	3,06
S54 LU	-	0,32	0,29	2,38	-	2,23
S55 LU	0,74	0,81	0,86	3,67	3,76	3,54
S56 LU	0,85	0,87	-	3,90	4,24	4,16
S57 LU	0,59	0,62	0,61	3,78	3,71	3,67
S58 LU	0,73	0,70	0,72	4,03	4,07	4,58
S59 LU	0,68	0,66	-	3,67	4,12	4,13
S60 LU	0,54	-	0,48	3,58	3,85	3,80
S61 LU	0,58	0,54	0,54	2,97	2,75	3,02
S62 LU	-	0,61	0,57	2,73	3,00	2,67
S63 LU	0,58	0,67	0,58	3,11	3,26	2,93
S64 LU	0,70	-	0,67	4,82	4,54	5,10
S65 LU	0,80	0,70	-	4,04	4,85	4,50
S66 LU	0,43	-	0,32	4,02	4,60	4,51
S67 LU	0,32	0,51	-	2,57	2,37	2,45
S68 LU	-	0,44	0,34	2,37	2,10	2,27
S69 LU	0,35	-	-	-	1,75	1,67
S70 LU	0,95	0,88	-	4,68	5,45	5,40
S71 LU	0,67	-	0,73	4,52	4,88	4,27
S72 LU	0,80	0,70	-	-	4,84	5,26
S73 LU	-	0,46	0,39	3,55	3,62	3,56
S74 LU	0,56	0,49	-	3,83	3,36	3,49
S75 LU	0,45	-	0,37	2,93	3,33	3,03
S76 LU	-	0,48	0,56	-	3,30	3,14
S77 LU	0,43	-	0,44	-	3,58	3,77
S78 LU	0,61	0,63	0,61	3,60	3,30	3,53
S79 LU	0,67	0,61	0,60	4,16	3,72	-
S80 LU	0,58	0,59	0,54	3,45	3,47	3,38
S81 LU	0,61	0,51	0,56	3,52	3,54	3,18

Tabela F.8. Resultados do ensaio de porosimetria dos corpos-de-prova das argamassas feitas com areia reciclada lavada da Fase 5

Propriedade	Amostra													
	S52 LU	S55 LU	S58 LU	S61 LU	S64 LU	S67 LU	S70 LU	S73 LU	S76 LU	S79 LU				
Volume total de intrusão (ml/g)	0,231	0,224	0,242	0,239	0,23	0,232	0,235	0,237	0,211	0,239				
Área total de poros (m ² /g)	21,98	21,24	25,55	16,52	24,05	13,66	23,28	19,13	17,63	17,87				
Diâmetro dos poros - mediana (Volume) (nm)	135,2	144,4	100,7	280,4	133,9	704,1	94,9	197,2	213,9	202,5				
Diâmetro dos poros - mediana (Area) (nm)	13,4	13	13,05	19	9,85	18,65	15,55	14	15,05	18,25				
Diâmetro médio dos poros (4V/A) (nm)	42,25	42,3	37,85	58,75	38,8	68	40,45	49,55	50,95	54,95				
Densidade de massa aparente (kg/m ³)	1579	1597	1561	1529	1596	1584	1581	1558	1633	1547				
Densidade de massa específica (kg/m ³)	2488	2488	2505	2411	2519	2503	2515	2467	2491	2455				
Porosidade (%)	36,52	35,81	37,7	36,6	36,63	36,73	37,12	36,85	34,41	36,99				

Anexo G. Utilização de aditivos em argamassas e revestimentos feitos com areia reciclada

Os aditivos mais testados na pesquisa foram os incorporadores de ar e os hidrofugantes. Também foram utilizados, em campo e em menor escala, um redutor de retração e dois retentores de água.

O objetivo desta avaliação é verificar se estes produtos podem ser considerados como possíveis alternativas de melhoria das propriedades das argamassas e revestimentos.

A lista dos aditivos testados durante este estudo, com as siglas adotadas neste projeto, teor e local aplicação, consta na Tabela 104.

Tabela 104: Aditivos utilizados durante a Fase 1.

Tipo de aditivo	Sigla	Aplicação	Teor
Incorporadores de ar	R	Laboratório	0,2 e 0,3 ¹
	T	Laboratório	0,1 ¹
	D	Laboratório	100 ¹
	S	Laboratório	0,1 a 0,4 ¹
	C	Laboratório	0,04 a 0,12 ¹
	M	Laboratório	0,15 e 0,25 ¹
	G	Revestimento	0,4 e 0,5 ¹
	H	Revestimento	0,10; 0,15; 0,3; 0,4; 1,0 ¹
	MO	Revestimento	0,3 e 0,5 ¹
	MOM	Revestimento	0,5 ¹
Hidrofugantes e impermeabilizantes de massa	HP	Revestimento	2,0 ³
	DW	Revestimento	1,0 ³
	RB	Revestimento	0,5 e 1,0 ²
	EA	Revestimento	0,05 ²
Redutores de retração	E	Revestimento	1,5 ³
	A	Revestimento	0,15 ²
Retentores de água	TY	Revestimento	0,5 ³

Obs. 1) Para os incorporadores de ar, o teor está expresso em % da massa de cimento, com exceção do aditivo D, que está em ml por m³ de argamassa fresca.

2) Os aditivos RB, A, EA estão expressos em % da massa total anidra da argamassa.

3) Os aditivos HP, DW, E e TY estão expressos em % da massa de cimento.

Os aditivos utilizados foram produzidos por fabricantes idôneos encontrados no mercado.

Optou-se por avaliar a eficácia dos aditivos utilizando-se as amostras de areia reciclada não lavadas coletadas na usina de Socorro/SP, por possuírem características peculiares que influenciam no desempenho dos aditivos.

Para isto, alguns dos aditivos passaram por testes preliminares em laboratório para determinar aqueles com melhor desempenho e que seriam testados em campo, além de definir o seu teor. Entretanto, com a disponibilidade que surgiu de testar os aditivos diretamente em revestimentos, alguns dos produtos não passaram por este teste preliminar.

O procedimento de mistura das argamassas, para a realização dos ensaios nos estados fresco e endurecido, explicados nos itens 5.3.2 e 5.3.2.3, dependeu da presença ou não de aditivo na argamassa e do estado físico do aditivo utilizado (sólido ou líquido). Assim, foram definidas duas alternativas:

- para argamassas com aditivos em pó: homogeneizar o cimento, a areia reciclada e o aditivo previamente, colocar água na argamassadeira, adicionar a mistura anidra na argamassadeira e bater por 2 minutos, repousar por 10 minutos e bater por mais 2 minutos;
- para argamassas com aditivos líquidos: adicionar o aditivo e a água de amassamento na argamassadeira, colocar o cimento e a areia reciclada (previamente homogeneizados) e bater por 2 minutos, repousar por 10 minutos e bater por mais 2 minutos.

O primeiro método de mistura descrito é interessante quando se pretende produzir argamassas ensacadas que possuem aditivos em pó. O segundo método foi adotado por se notar que, com os aditivos líquidos testados, seu desempenho era melhor com este método.

Inicialmente, foram feitos testes com as seis primeiras amostras não lavadas de Socorro, em laboratório, na proporção 1:6 e 1:8, com os 5 primeiros aditivos incorporadores de ar descritos na Tabela 104. Seria considerado um bom desempenho se o aditivo incorporador de ar diminuísse a variabilidade no consumo de água das argamassas e apresentasse estabilidade de incorporação em função do tempo de mistura.

Para os demais aditivos, foram realizados testes em campo, através da execução de painéis de revestimento de 1 m² cada. Como parâmetro de análise de eficácia, eles deveriam ser capazes de diminuir a variabilidade das propriedades das argamassas, bem como melhorar aquelas que se mostraram prejudiciais à aplicação em alvenaria ou como revestimento, como plasticidade, exsudação, absorção capilar e fissuração dos revestimentos, sem um prejuízo de outras propriedades (como a resistência mecânica e a aderência).

Um resumo dos testes realizados nesta Fase consta na Tabela 105.

Tabela 105: Resumo dos ensaios realizados utilizando-se aditivos.

Propriedades	Método	Proporção de mistura	Materiais	Aditivos
Relação a/c (para 275 ± 15 mm)	-	1:6 e 1:8, areia seca, com e sem aditivo	Cimento CP II E 32, amostras não lavadas de Socorro S1 a S6	R, T, D, S, M, H, C, MOM
Densidade de massa	NBR 13278/95			
Teor de ar incorporado	NBR 13278/95			
Consumo de cimento por m ³	-			
Manutenção de consistência e de densidade	-	1:6 (areia seca) com aditivo	Cimento CP II E 32, amostras não lavadas de Socorro S2 e S4	IAR D e T
Densidade x tempo de mistura	-	1:6 (areia seca), com aditivo	Cimento CP II E 32, amostras não lavadas de Socorro S2, S4 e S6	IAR T, D, H, M e MOM
Aderência à tração	NBR 13528/95	1:6 (areia úmida) com aditivo	Cimento CP III 40 RS, amostras não lavadas de Socorro S9, S11 a S15 e S17 a S22	H, G, D, MOM, EA, DW, RB, HP, E, A e TY
Controle de fissuras	-			

Para aqueles que apresentaram melhores resultados, foi considerada sua influência no custo final da argamassa (por m³).

G.1) Avaliação da influência de aditivos incorporadores de ar nas propriedades de argamassas feitas com amostras não lavadas de areia reciclada obtidos em Socorro/SP

A Tabela 106 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as argamassas feitas com seis amostras de Socorro, na proporção 1 : 6 e 1 : 8, com cinco incorporadores de ar.

Em geral, o uso de incorporadores de ar diminuiu o consumo de água das argamassas, em torno de 2 a 3%, para uma consistência constante. Entretanto, para que isto ocorresse, foi necessário diminuir significativamente a densidade de massas das argamassas (abaixo de 1500 kg/m³), resultando em elevados teores de ar incorporado e queda da resistência mecânica. Para evitar isso, foi necessário alterar a proporção inicial em massa de 1:8 para 1:6.

A queda no consumo de água das argamassas com aditivo IAR foi independente da relação água/materiais secos das argamassas sem o aditivo, o que impede que ele seja utilizado para controle de homogeneização das argamassas, já que sua dosagem em diferentes teores visando o controle do consumo de água produziria argamassas com teores de ar e densidades de massa totalmente diferentes.

Com exceção dos aditivos T e D, pode-se dizer que, para os demais aditivos IAR, foi necessário o uso de um teor elevado deles (cerca de 0,5% da massa de cimento) para que surgisse o efeito de incorporação de ar desejado. Assim, o uso destes aditivos foi descartado, dando-se preferência ao T e ao D.

Vale lembrar que, neste trabalho, o uso de aditivos IAR em alto teor se deve ao elevado teor de materiais finos < 75 µm presentes nas amostras de Socorro/SP. Isto foi verificado retirando-se a fração passante na peneira de malha 0,15 mm, causando a diminuição do teor de aditivo T de 0,10% para 0,03%.

Tabela 106: Resultados de caracterização das argamassas com areia reciclada de Socorro/SP utilizando-se cinco aditivos IAR.

Amostra	Proporção de mistura (massa)	H total (%)	H efetivo (%)	Denominação do aditivo	Teor de aditivo ¹	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consistência (mm)
	1:8	24	18,8	R	0,30%	1,84	6	164	260
	1:8	24	18,8	R	0,20%	1,79	9	161	275
	1:8	22	16,8	T	0,15%	1,40	30	128	248
	1:6	22	17,0	T	0,10%	1,59	20	187	231
	1:6	22	17,0	D	100 ml	1,55	23	181	281
	1:8	28	21,2	S	0,20%	-	-	-	284
	1:8	25	18,2	T	0,15%	1,44	26	128	249
	1:6	25	18,5	T	0,10%	1,78	9	204	222
	1:6	26	19,5	T	0,10%	1,45	25	164	262
	1:6	26	19,5	D	100 ml	1,86	4	211	254
	1:8	26	21,0	R	0,50%	1,46	25	128	288
	1:8	24	19,0	R	0,50%	1,75	11	157	266
	1:8	25	20,0	S	0,50%	1,56	20	139	263
	1:8	24	19,0	C	0,50%	1,65	16	148	257
	1:8	24	19,0	T	0,50%	1,03	47	93	252
	1:8	22	17,0	T	0,40%	1,04	48	94	236
	1:8	22	17,0	T	0,20%	1,26	37	114	236
	1:8	22	17,0	T	0,10%	1,81	9	165	184
	1:8	22	17,0	T	0,15%	1,57	21	143	216
	1:6	26	21,1	-	-	1,86	4	210	261
	1:6	22	17,1	T	0,15%	1,34	33	157	245
	1:8	23	18,0	T	0,15%	1,33	33	120	245
	1:6	25	20,1	T	0,10%	1,52	22	173	260
	1:6	25	20,1	D	100 ml	1,40	29	160	285

1:6	25	22,3	T	0,10%	1,47	25	168	245
1:6	25	22,3	D	40 ml%	1,85	5	212	240
1:6	27	24,3	D	100 ml	1,84	4	207	249
1:6	24	20,8	-	-	1,81	8	209	257
1:6	23	19,8	T	0,10%	1,36	31	158	250
1:6	24	20,8	T	0,07%	1,44	27	166	241
1:6	23	19,8	D	100 ml	1,25	37	145	273
1:6	24	19,6	-	-	1,78	10	205	254
1:6	23	18,6	T	0,10%	1,27	36	148	249

¹ O aditivo D foi dosado na unidade ml/m³ de argamassa sem aditivo. Os demais foram dosados em % da massa de cimento.

Por outro lado, o aditivo IAR se mostrou útil para melhorar as propriedades no estado plástico das argamassas sem material passante na peneira de abertura de malha 0,15 mm.

Foram verificados, para os aditivos T, D, H e M, seus efeitos na densidade de massa fresca em função do tempo de agitação na argamassadeira e a manutenção de consistência das argamassas em função do tempo.

Pelos resultados da Figura 120 e da Figura 121, nota-se que os aditivos T, H e M tiveram um desempenho insatisfatório devido à grande variação dos resultados, enquanto que o D mostrou ser bem mais estável à variação do tempo de agitação.

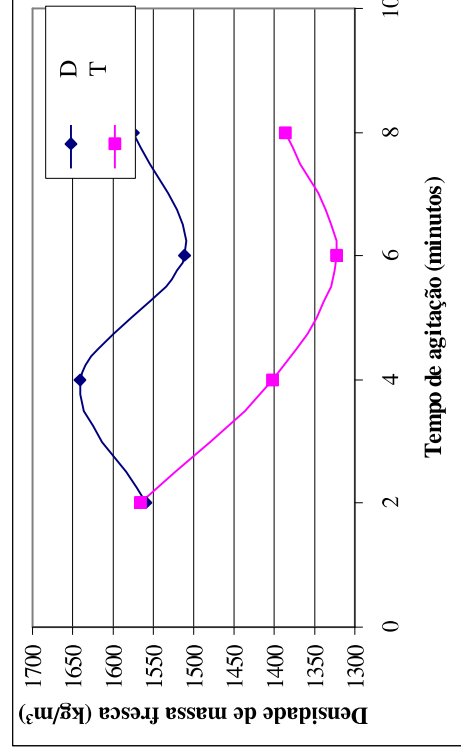


Figura 120: Variação da densidade de massa das argamassas com a amostra S4 NL de Socorro/SP, na proporção 1:6, com os aditivos T e D, em função do tempo de agitação na argamassadeira.

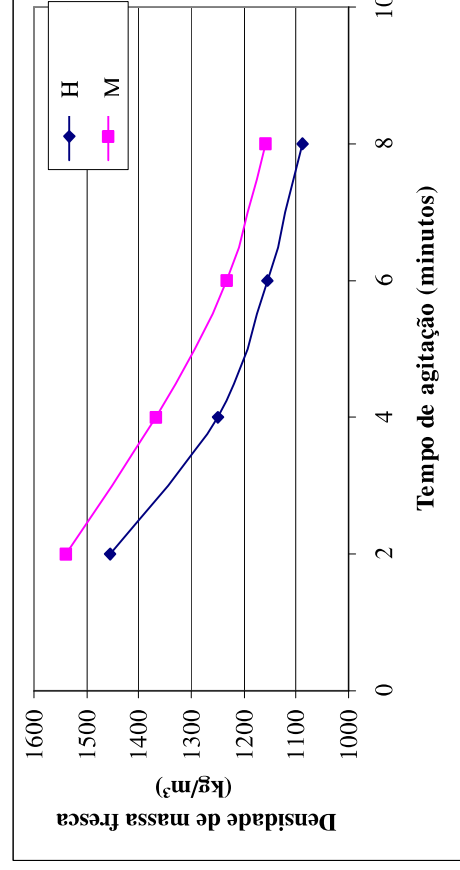


Figura 121: Variação da densidade de massa das argamassas com a amostra real S6 de Socorro/SP, na proporção 1:6, com os aditivos H e M, em função do tempo de agitação na argamassadeira.

Quanto à manutenção de consistência (Figura 122), considera-se suficiente o tempo que a argamassa com T permaneceu trabalhável sem reamassamento com água.

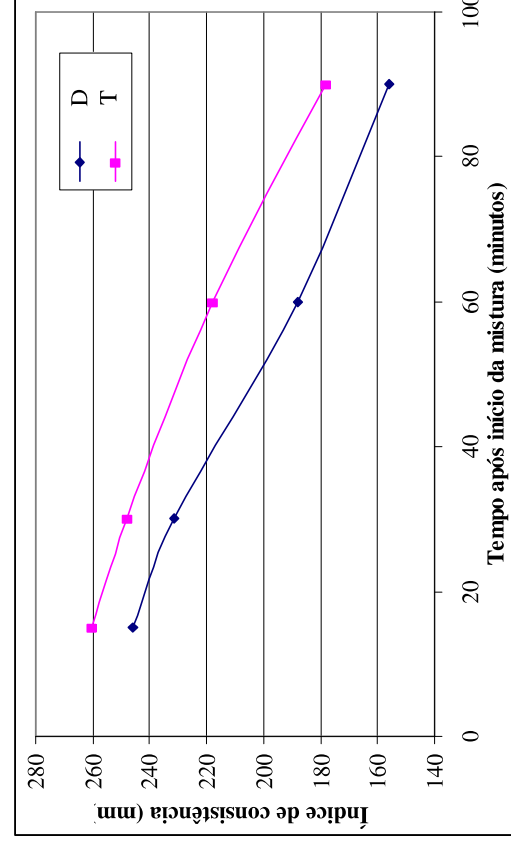


Figura 122: Manutenção de consistência das argamassas com T e D, na proporção 1:6.

O custo por kg e por m³ das argamassas produzidas com a amostra S3 NL de Socorro, com e sem os aditivos IAR, considerando-se apenas o custo dos materiais, estão descritos na Tabela 107. Observa-se que o uso do aditivo não encareceu significativamente o custo da argamassa.

Tabela 107: Custo por kg e por m³ das argamassas produzidas com cimento CP II F, a amostra S3 de areia reciclada coletada em Socorro/SP e os aditivos IAR encontrados no mercado, considerando apenas o custo dos materiais.

Aditivo	Proporção de mistura (massa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de areia reciclada (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	Teor de aditivo	Custo da argamassa (R\$/m ³)	Custo da argamassa (R\$/m ³) ⁴
Referência	8	162	1295	306	-	0,033	48,47
C ¹	8	148	1186	253	0,50	0,033	45,39

R¹	8	157	1257	268	0,50	0,035	50,86
S	8	139	1111	250	0,50	0,035	45,00
T²	8	143	1141	218	0,15	0,034	44,49
Referência	6	210	1263	312	-	0,041	60,98
D¹	6	160	958	225	100	0,042	64,12
T²	6	173	1041	245	0,10	0,042	51,80

¹Preço de venda diretamente no fabricante.

²Preço de venda em representantes.

³Para o D o consumo está expresso em ml por m³ de argamassa. Para os demais aditivos, como porcentagem da massa de cimento.

⁴Considerado também o custo com o consumo de água.

G.2 Avaliação da influência de aditivos no desempenho de revestimentos de argamassa feitos com amostras não lavadas de areia reciclada, obtidas em Socorro/SP

O teste de desempenho de revestimentos de argamassa com aditivos foi realizado em dois locais distintos: em laboratório e em campo (usina de Socorro/SP).

Foram produzidos três painéis de revestimento de argamassa, com 1 m² cada, aplicados em bloco de concreto com chapisco 1:3 em massa, da seguinte forma: o primeiro na proporção 1:8 em massa seca sem aditivo, o segundo na proporção 1:6 em massa e com 0,10% de T e o terceiro na proporção 1:6 com a dosagem de 40 ml/m³ de D. A amostra de areia reciclada de Socorro/SP utilizada foi a S4 NL. (Figura 123).

Os resultados obtidos para resistência de aderência à tração foram abaixo do limite da norma NBR 13528/95 (0,20 MPa) para todos os três painéis. Quanto ao surgimento fissuras, este foi menor para o painel com o aditivo T que apresentou maior incorporação de ar. O revestimento feito com D, que teve a dosagem deste aditivo insuficiente, não incorporou ar e, possuindo o maior teor de finos < 75 µm, foi o que apresentou maior quantidade de fissuras. Considera-se que todos os três painéis apresentaram fissuração excessiva e que o IAR, mesmo diminuindo o consumo de água, não foi suficiente para o controle de fissuras. A Tabela 108 apresenta os resultados de controle de fissuras e de aderência à tração desses revestimentos.

Tabela 108: Resultados de contagem de fissuras dos revestimentos de argamassa com a amostra S4 de Socorro/SP, com e sem a utilização de IAR.

Painel	Proporção de mistura (massa seca)	Tipo e teor de aditivo IAR	Densidade de massa fresca (kg/m^3)	Teor de ar incorporado (%)	Aderência à tração média (MPa)	Fissuras (cm/m^2)
1	1:8	Nenhum	1840	3	0,06	511
2	1:6	T - 0,10%	1470	25	0,04	244
3	1:6	D - 40ml/m ³	1850	5	0,11	668

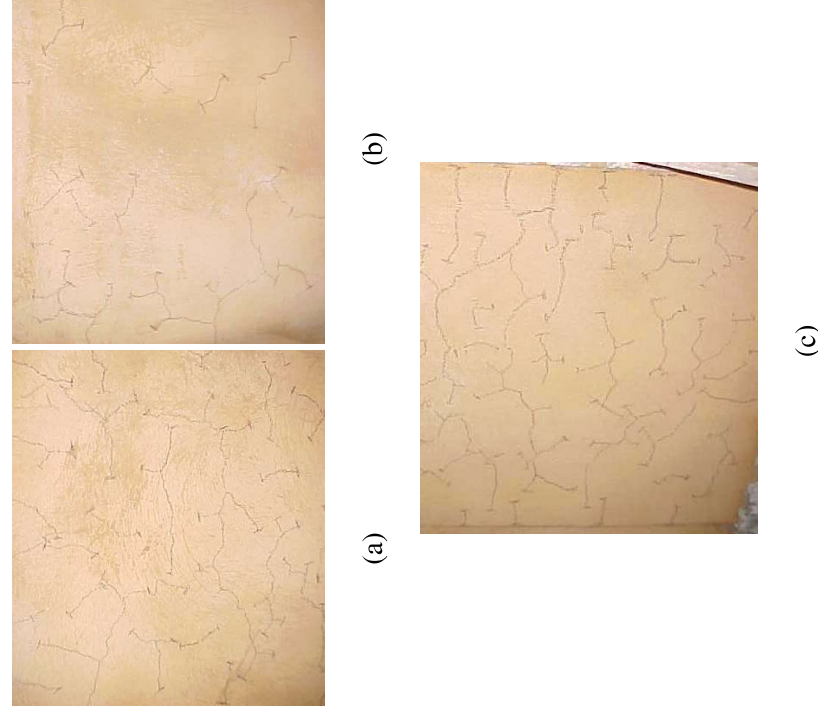


Figura 123: Verificação do surgimento de fissuras em revestimentos de argamassa feitos com amostras não lavadas de areia reciclada de Socorro/SP, em blocos de concreto com chapisco. a) Argamassa na proporção 1: 8 em massa sem aditivo. b) Argamassa 1: 6 com IAR T no teor 0,10%. c) Argamassa 1: 6 com IAR D, no teor de 40 ml por m³.

Em campo, foram produzidos, com o uso de aditivos, os revestimentos descritos na Tabela 109 e apresentados na Figura 124.

O uso de aditivos IAR em geral diminuiu o surgimento de fissuras quando o teor de ar era superior a 20%. Entretanto, com exceção dos aditivos D e MOM, os demais apresentaram diferenças significativas na incorporação de ar em função do método de mistura, não sendo, portanto, adequados.

Os aditivos hidrofugantes (HP, DW e EA) não tiveram ação sobre o surgimento de fissuras e o seu desempenho quanto à hidrofugação ainda não foi avaliado.

O aditivo redutor de retração E também não apresentou bom desempenho em termos de controle de fissuras para o teor utilizado.

Os aditivos retentores de água A e Ty aumentaram significativamente o consumo de água e a fissuração dos revestimentos.



(a)



(b)

Figura 124: Revestimentos de argamassa produzidos na usina de Socorro com o uso de cimento CP III 40 RS, areia reciclada não lavada e aditivos. (a) Argamassa com aditivo E 1,5%, todo fissurado. (b) Argamassa com aditivo G 0,5%, praticamente sem fissuras.

Considera-se então que o uso destes aditivos pode ser útil para melhorar determinadas propriedades das argamassas e dos revestimentos, mas não foi eficaz para o controle de homogeneidade de desempenho dos revestimentos.

Tabela 109: Revestimentos de argamassa com cimento CPIII 40 RS, areia não lavada e aditivos, produzidos na usina de Socorro.

Amostra	Substrato	Proporção de mistura	Aditivo	Diâmetro (mm)	Mistura	Espessura mm	H total (%)	H efetivo (%)	a/c efetivo	Abatimento (mm)	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar (%)	Fissura (cm/m ²)	Aderência (MPa)
S9 NL	TCU	5,64	H 1,0%	2,4 e 0,15	Enxada	15	29,67	24,79	1,65	115	1606	17,2	30,8	0,08
S11 NL	TCU	5,63	H 0,4%	2,4 e 0,15	Bet 2'	15	29,63	22,61	1,50	75	1494	23,6	2,98	0,07
S11 NL	TCU	5,63	H 0,4%	2,4 e 0,15	Bet. 1'	15	29,63	22,61	1,50	-	1622	17,0	120,6	0,09
S12 NL	TCU	5,80	H 0,3%	2,4 e 0,15	Bet. 2,5'	15	28,47	25,68	1,75	100	1594	18,9	139	0,13
S12 NL	TCU	5,80	G 0,5%	2,4 e 0,15	Bet. 2,5'	15	24,47	21,68	1,48	155	1521	25,0	43	0,09
S12 NL	TCU	5,80	H 0,3%	2,4 e 0,15	Enx. 6,5'	15	28,47	25,68	1,75	120	1667	15,2	449	0,13
S13 NL	TCU	5,54	G 0,4%	2,4 e 0,15	Bet. 2,5'	15	28,39	24,85	1,63	40	1606	18,2	-	0,04
S13 NL	TCU	5,54	G 0,4%	2,4 e 0,15	Enxada	15	30,33	26,80	1,75	75	1688	12,8	-	0,06
S14 NL	TCU	7,15	H,A,EA	-	Bet. 2,5'	15	39,76	32,81	2,67	-	1722	5,9	TF	0,08
S17 NL	TCU	7,20	D 100ml	2,4 e 0,15	Bet. 2,5'	15	36,82	33,23	2,72	90	1779	3,9	TF	-
S18 NL	TCU	7,08	TY	2,4 e 0,15	Bet. 2,5'	15	36,18	34,38	2,78	70	1686	7,4	TF	-
S19 NL	TCU	5,52	MOM0,5%	2,4 e 0,15	Bet. 5'	15	28,03	26,27	1,71	75	1772	9,1	TF	-
S19 NL	TCU	7,36	DW 1%	2,4 e 0,15	Bet. 5'	15	27,77	25,94	2,17	115	1553	20,3	TF	-
S19 NL	TCU	7,36	HP 2%	2,4 e 0,15	Bet. 5'	15	27,77	25,94	2,17	60	1834	5,9	TF	-
S19 NL	TCU	7,36	E 1,5%	2,4 e 0,15	Bet. 5'	15	27,77	25,94	2,17	50	1827	6,2	TF	-
S19 NL	BC	7,04	DW 1%	2,4 e 0,15	Bet. 5'	20	32,71	30,89	2,48	85	1661	11,8	TMF	0,09

Obs: 1) BC = bloco de concreto sem chapisco; TCS = tijolo cerâmico maciço seco, sem chapisco; TCU = tijolo cerâmico maciço úmido, sem chapisco.

2) Bet. 2,5' = misturada em betoneira no tempo de 2,5 minutos.

3) TF = toda fissurada; TMF = toda microfissurada.

4) Proporção de mistura em massa seca, indicando a razão entre a massa de areia e a massa de cimento.

Anexo H. Tabelas de obtenção de números randômicos para amostragem de materiais - ASTM 3665/99

Tamanho do lote: 2 m³ Tempo necessário para formação do lote: 2 h

Amostra	Data	Número randômico			Momento de coleta (h)		
		1	2	3	1	2	3
S26	3/11/2003	0,16	0,275	0,706	0,32	0,55	1,412
S27	4/11/2003	0,035	0,443	0,725	0,07	0,886	1,45
S28	5/11/2003	0,541	0,733	0,786	1,082	1,466	1,572
S29	6/11/2003	0,532	0,704	0,794	1,064	1,408	1,588
S30	7/11/2003	0,452	0,689	0,96	0,904	1,378	1,92
S31	12/11/2003	0,427	0,497	0,637	0,854	0,994	1,274
S32	12/11/2003	0,128	0,555	0,927	0,256	1,11	1,854
S33	13/11/2003	0,373	0,401	0,846	0,746	0,802	1,692
S34	13/11/2003	0,401	0,549	0,785	0,802	1,098	1,57
S35	13/11/2003	0,116	0,726	0,878	0,232	1,452	1,756
S36	19/11/2003	0,085	0,401	0,64	0,17	0,802	1,28
S37	20/11/2003	0,499	0,645	0,733	0,998	1,29	1,466
S38	20/11/2003	0,09	0,482	0,665	0,18	0,964	1,33
S39	20/11/2003	0,31	0,438	0,614	0,62	0,876	1,228
S40	20/11/2003	0,137	0,581	0,877	0,274	1,162	1,754
S41	25/11/2003	0,142	0,434	0,709	0,284	0,868	1,418
S42	25/11/2003	0,324	0,441	0,664	0,648	0,882	1,328
S43	25/11/2003	0,128	0,247	0,417	0,256	0,494	0,834
S44	26/11/2003	0,16	0,719	0,771	0,32	1,438	1,542
S45	27/11/2003	0,09	0,405	0,699	0,18	0,81	1,398

Anexo I. Absorção de água dos agregados da Fase 4 na condição saturado superfície seca, nos tempos de 10 minutos, 30 minutos e 24 horas de imersão.

Amostra	Absorção (%)	Porcentagem dos resultados			Diferença dos resultados	
		10/30	10/24	30-10	24-10	
S26 10 min	2,1					
S26 30 min	2,7	77	87	0,6	0,3	
S26 24 h	2,4					
S27 10 min	1,9					
S27 30 min	2,4	80	96	0,5	0,1	
S27 24 h	2,0					
S29 10 min	2,0					
S29 30 min	2,3	84	93	0,3	0,1	
S29 24 h	2,1					
S32 10 min	1,8					
S32 30 min	2,4	75	91	0,6	0,2	
S32 24 h	2,0					
S34 10 min	3,0					
S34 30 min	3,4	88	94	0,4	0,2	
S34 24 h	3,2					
S36 10 min	3,6					
S36 30 min	4,0	89	96	0,4	0,1	
S36 24 h	3,7					
S38 10 min	3,7					
S38 30 min	4,1	90	95	0,4	0,2	
S38 24 h	3,9					
S39 10 min	5,8					
S39 30 min	6,4	90	97	0,64	0,19	
S39 24 h	6,0					
S41 10 min	3,5					
S41 30 min	3,7	93	98	0,2	0,1	
S41 24 h	3,6					
S43 10 min	1,9					
S43 30 min	2,2	83	86	0,3	0,3	
S43 24 h	2,2					
S44 10 min	3,0					
S44 30 min	3,6	82	90	0,6	0,3	
S44 24 h	3,3					
S45 10 min	1,8					
S45 30 min	2,1	86	92	0,3	0,1	
S45 24 h	2,0					

ANEXO J. Orientação para a montagem de laboratório de controle de areia reciclada e argamassas.

Este documento pretende estabelecer os equipamentos mínimos necessários à montagem de um laboratório em uma usina de reciclagem para execução de ensaios em areia reciclada e argamassas.

1) Equipamentos de laboratório

- jogo de peneiras ABNT série normal (4,8, 2,4, 1,2, 0,6, 0,3 e 0,15 mm) com tampa e fundo – NBR 7217/87;
- conjunto para determinação do teor de materiais pulverulentos (peneira 0,075 mm e tripé) – NBR 7219/87;
- conjunto para determinação da absorção de água da areia (tronco de cone, soquete, aquecedor elétrico) – NBR 9777/87;
- conjunto para determinação da densidade de massa aparente da areia (caixa de volume conhecido, régua rasadora) – NBR 7251/82;
- kit para determinação expedita do teor de sulfatos solúveis – método de SEELE *et al.* (2004);
- conjunto para determinação da densidade de massa fresca da argamassa (recipiente, régua rasadora, soquete) – NBR 13278/95;
- conjunto para determinação da consistência por meio da mesa de consistência ou forma de abatimento de concreto;
- balança de 5 kg, com escala de 0,01 g no caso de testes com aditivos, ou de 0,05 g para os demais casos;
- balança de 50 kg com escala de 10 g;
- argamassadeira com capacidade nominal de 5 litros;
- fogão a gás;
- bandejas (5) e tachos metálicos (5), cronômetro (2), espátula (2);

- formas de 4 x 4 x 16 cm (no mínimo 6).

2) Equipamentos adicionais para controle de argamassas no estado endurecido e de revestimentos

- prensa para ensaios de resistência à tração na flexão: a ser realizado em laboratório especializado ou em dispositivo mecânico a ser desenvolvido na usina;
- conjunto para ensaio de resistência de aderência à tração: por meio de braço de alavanca ou equipamento apropriado (Dinateste, por exemplo). Uso ainda de furadeira e extensão elétrica;
- enxada ou betoneira de, pelo menos, 120 litros de capacidade nominal (ideal 300 litros).

3) Materiais de consumo

Cimento, cal, fita crepe, sacos plásticos de 5 e 20 kg, pincel atômico, fichas de controle de ensaios, luvas de borracha, luvas de couro, etiquetas, elementos de alvenaria (no caso de testes em revestimentos), massa plástica e serra-copo de 5 cm de diâmetro (no caso de ensaios de resistência de aderência à tração).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACQUAVIVA, M.C. **Vandemecum do código do consumidor**. Ed. Jurídica Brasileira, 1230p. São Paulo, 1998.
- AGUIAR, G. **Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção**. São Paulo, 2004. 201p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ALMEIDA, A.C. **Como são feitas as pesquisas eleitorais e de opinião**. FGV Editora. Rio de Janeiro. 2002, 196 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for sampling aggregates - ASTM D75**. 1997.
- _____. **Standard practice for random sampling of construction materials - ASTM D 3665**. 1999.
- _____. **Standard Specification for Masonry Cement - ASTM C91-03a**.
- _____. **Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar - C144-04**.
- ANGULO, S. C. *et al.* Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: Seminário de Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, 5, 2002, São Paulo. **Anais**: São Paulo: IBRACON/IPEN. 2002a. p. 293-307.
- ANGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ANGULO, S.C.; ULSEN, C.; CARRIJO, P.M.; SILVA, R.M. JOHN, V.M.; KAHN, H. Characterization of Brazilian construction and demolition waste coarse recycled aggregate, v1, Spain, 2004. **Proceedings**. Spain, RILEM Publications S.A.R.L., 2004. p. 87-96 (RILEM Proceedings PRO 40).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Planos de amostragem e procedimentos na inspeção por variáveis - NBR 5429**. Rio de Janeiro, 1985.

- _____. **Guia de utilização da norma NBR 5429 – planos de amostragem e procedimentos na inspeção por variáveis – NBR 5430.** Rio de Janeiro, 1985.
- _____. **Agregados – determinação do inchamento de agregado miúdo – NBR 6467.** Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica – NBR 6508.** Rio de Janeiro, 1988.
- _____. **Solo - Análise granulométrica - NBR 7181.** Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento – NBR 7200.** Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **Agregado para concreto – NBR 7211.** Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **Agregados – determinação da composição granulométrica – NBR7217.** Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Agregados - determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - NBR 7218.** Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos – NBR7219.** Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Agregado em estado solto - determinação da massa unitária – NBR 7251.** Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **Agregado graúdo - determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - NBR 7809.** Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **Argamassa endurecidas para alvenaria estrutural – retração por secagem – NBR 8490.** Rio de Janeiro, 1984a.
- _____. **Execução de alvenaria sem função estrutural de tijolos e blocos cerâmicos - NBR 8545.** Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **Agregados – determinação da massa de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – NBR 9776.** Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Agregados – determinação da absorção de água em agregados miúdos – NBR 9777.** Rio de Janeiro, 1987.

- _____. **Solo - Índice de suporte Califórnia - NBR 9895**. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Agregados para concreto – determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis – NBR 9917**. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Resíduos sólidos – Classificação – NBR 10004**. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **Amostragem de resíduos – Procedimento – NBR 10007**. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **Acústica – avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento- NBR 10151**. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão – NBR 13276**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da retenção de água – NBR 13277**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado – NBR 13280/95**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido 13280/95**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos - NBR 13281**. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração - NBR 13528**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia - NBR 13529**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação - NBR 13749**. Rio de Janeiro, 1996.

- _____. **Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – áreas de transbordo e triagem – diretrizes para projeto, implantação e operação. NBR 15112.** Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação – NBR 15114.** Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos - NBR 15116.** Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **Agregados - amostragem – NM 26.** Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **Agregados - redução da amostra de campo para ensaios de laboratório - NM 27.** 2000.
- _____. **Agregado miúdo - determinação da absorção de água – NM 30.** Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **Agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometros por lavagem – NM 46.** Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água – NM 53.** Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **Agregados - determinação da composição granulométrica – NM 248.** Rio de Janeiro, 2001.
- ACC - ASSOCIATION CANADIENNE DE LA CONSTRUCTION. **Guide des meilleures pratiques en matière de réduction des déchets solides.** Document normalisé de construction – 81. 2001.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - **Methodes d'essai pour mortier à maçonner – partie 11: détermination de la résistance à la flexion et en compression du mortier durci -EN-1015.** Brussels, 1993.
- BAGLIONI, A.; BONECCHI, M. Building design and recycle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Paris, 1997. **Proceedings**, Paris, CSTB, 1997. v.1, p.699-704.

- BARROS, M.M.S.B. **Parâmetros para especificação de argamassas de revestimento externo** (PCC-USP). Apresentação de Power Point. 2003.
- BASTOS, P.K.X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimentos**. São Paulo, 2001. 172p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BOILEAU, H.; LACHAMBRE, V.; ACHARD, G. Waste on new building construction sites: existing situation and proposals for a better management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Paris, 1997. **Proceedings**. Paris, CSTB, 1997. v.1, p.717-24.
- BOLORINO, H.; CINCOTTO, M.A. A influência do tipo de cimento nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador, 1997. **Anais**. Salvador, ANTAC, 1997. p.15-25.
- BORTOLUZZO; C. W. **Contribuição ao estudo do comportamento mecânico dos revestimentos de argamassa**. São Carlos, 2000. 238 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BRESSI, G. **Recycling of construction and demolition waste: te Italian Technology**. Milano, Italy. Tecnitalia Consultants, Via Vigoni 5, 20122 (Member of the working group of the EU on the construction and demolition waste).
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **External rendered finishes - BS 5262**. London, 1976. (Code of practice 221).
- _____. **Specification for mortar for masonry - rendering and plastering mortar - prEN 998-1**. 2003
- _____. **Specification for mortar for masonry - masonry mortar – BS EN 998-2**. 2002.
- _____. **Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Methods for the determination of resistance to fragmentation - BS EN 1097-2**. 1998.
- _____. **Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption - BS EN 1097-6**. 2000.

- _____. **Specifications for building sands from natural sources – BS 1200.** 1976.
- _____. **Tests for chemical properties of aggregates. Chemical analysis - BS EN 1744:1.** 1998.
- _____. **Tests for chemical properties of aggregates. Preparation of eluates by leaching of aggregates - BS EN 1744-3.** 2002.
- BRITO FILHO, J. A. Cidades versus entulhos. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., São Paulo, 1999. **Anais.** São Paulo, IBRACON, 1999. p.56-67.
- BÜCHER, H.R.E.; MÜLLER, M.S.K. Argamassas industrializadas para revestimento de superfícies e assentamento de alvenaria. **Anais.** Argamassas Industrializadas – usos e desempenho. São Paulo, 1993.
- CABRERA, J.L.A. Morteros de albanilería com escombros de demolición. **Materiales de Construcción**, v.47, n.246, p.43-8, abr/jun, 1997.
- CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo.** 2.ed. São Paulo. Humanitas. Editora/FFLCH/USP, 1998.
- CARASEK, H.; SCARTEZINI, L.M.B. Evolução da resistência de aderência dos revestimentos de argamassa mista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 3., Vitória, 1999. **Anais.** Vitória, ANTAC, 1999. p.503-515.
- CARASEK, H., CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L.M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4. Brasília, 2001. **Anais.** Brasília, ANTAC, 2001. p.43-67.
- CARNEIRO, A.M.P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.** São Paulo, 1999. 170p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- CARNEIRO, A.P. *et al.* Characterization of C&D waste and processed debris aiming the production of construction materials. In: CIB SYMPOSIUM ON CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT – THEORY INTO PRACTICE, São Paulo, 2000. **Anais**. São Paulo. EPUSP, 2000.
- CARNEIRO, A.P. *et al.* **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção** - Projeto Entulho Bom. Salvador. EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.
- CARRIJO, P.M. **Análise da Influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. São Paulo, 2005. 129p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT –**Travaux d’enduits aux mortiers de liante hydrauliques – cahiers des charges - D.T.U. 26.1**. Paris, 1978.
- _____. **Certification CSTB des enduits monocouches d’impermeabilisation - modalités d’essais** - Livraison 341, cahier 2669-4. Paris, 1993.
- CHAVES, A.P. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios**. 2.ed., São Paulo: Editora Signus, 2002, v.1.
- CHAVES, A.P. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios**. 1.ed., São Paulo: Editora Signus, 1996, v.2.
- CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios - britagem, peneiramento e moagem**. 1.ed., São Paulo: Editora Signus, 1999, v.3.
- CHUNG, S.L.; CARLOS, W.H. Evaluation sustainability in waste management: the case of construction and demolition, chemical and clinical wastes in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 37, 2003.
- CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.A.C.; CASCUDO, H.C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995,118p. (Boletim 68 - Publicação IPT 2378).

- CIDADE DE CIRÍACO (SITE NÃO OFICIAL DA PREFEITURA). **Britador Móvel montado em chassi de caminhão**. Disponível em: <<http://www.ciriadors.hpg.ig.com.br/britador.htm>>. Acesso em março 2003.
- CORINALDESI, V.; GIUGGIOLINI, M.; MORICONI, G. Use de rubble from building demolition in mortars. **Waste Management**, 22. p.893-899. 2000.
- COSTA, N.A.A. da; COSTA JR., N.C.A. da; DETONI, M.M.L.; SELIG, P.M.; ROCHA, J.C. A reciclagem de resíduo de construção e demolição: uma aplicação da análise multivariada. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. São Paulo. 2004. **Anais**. São Paulo. ANTAC. 2004.
- D'ALMEIDA, M.L.O.; VILHENA, A. **Lixo municipal – manual de gerenciamento integrado**. 2.ed., São Paulo: IPT – CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem), 2000, 370p (Publicação IPT 2622).
- DÉTRICHÉ, C.H.; GALLIAS, J.L.; GRANDET, J.; MASO, J.C. Influence des paramètres de mise en oeuvre et de composition sur le comportement des mortiers d'enduit. **Matériaux et Constructions**, v.21, p.370-378, 1988.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. **Aggregates for mortar and concrete - Part 1: Normal-weight and heavy aggregates - DIN 4226-1**. 2001.
- _____. **Aggregates for mortar and concrete - Part 2: Lightweight aggregates - DIN 4226-2**. 2002.
- _____. **Aggregates for mortar and concrete – Part 100: Recycled aggregates - DIN 4226-100**. 2002.
- DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. São Paulo, 2004. 263p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- FAÇO - Fábrica de Aço Paulista S. A. **Crushing handbook** . 2. ed., 1986.
- FAÇO – Fábrica de Aço Paulista S. A. **Manual de britagem**. 1994.

- FERREIRA, F. M. **Otimização do projeto de pátios de homogeneização através do método da simulação condicional.** São Paulo, 1989. 129p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- FREEMAN, L. A.; HARDER, M. K. Environmental impact of transportation during the transfer and disposal of construction and demolition waste to landfill. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Paris, 1997. **Proceedings**, Paris, CSTB, 1997. v.1, p.707-715.
- GALLEGOS, H. Adhesión entre mortero y las unidades de albañilería. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGÍA DAS ARGAMASSAS, 1. Goiânia, 1995. **Anais**. Goiânia, UFG/ANTAC, 1995. p. 117-133.
- GLENCROSS-GRANT, R.; Walker, P. Survey of building sands in Australia. **Construction and Building Materials**, Elsevier. 17, p.259-268, 2003.
- HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: Editora Pini, 1995, 349p.
- HENDRIKS, C. F. **The building cycle.** Anaeas. 2000.
- ¹HENDRIKS, C. F.; JANSSEN, G.M.T. Application of construction and demolition waste. **Heron**, v. 46, n.2, p. 95-108, 2001 (publicado pela TNO Building and Construction Researchrijswijk e Netherlands School for Advanced Studies in Construction).
- ²HENDRIKS, C. F.; JANSSEN, G.M.T. Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions. **Heron**, v. 46, n.2, p. 109-117, 2001 (publicado pela TNO Building and Construction Researchrijswijk e Netherlands School for Advanced Studies in Construction).
- ³HENDRIKS, C. F.; JANSSEN, G.M.T. Testing regulations and procedures for environmental auditing of recycled aggregates. **Heron**, v.46, n.2, 2001 (publicado pela TNO Building and Construction Researchrijswijk e Netherlands School for Advanced Studies in Construction).
- HINGSTON, P. **Como abrir e administrar seu próprio negócio.** São Paulo: Publifolha, 2001, 192p.

JOHN, V.M.J. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2, São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, IBRACON, 1999. p.44-55.

JOHN, V.M.; AGOPYAN, V. In: SEMINÁRIO - RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>>. Acesso em dezembro 2003.

KASAI, Y. Guidelines and the present state of the reuse of demolished concrete in Japan. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY, 3., Odense, 1993. **Proceedings**. London, E & FN Spon, 1994. p.93-102. (RILEM Proceedings, 23).

KIBERT, C.J. Concrete/masonry recycling progress in the USA. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY, 3., Odense, 1993. **Proceedings**. London, E & FN Spon, 1994. p.83-92. (RILEM Proceedings, 23).

KIBERT, C. J.; LANGUELL, J. L. **Implementing deconstruction in Florida: materials reuse issues, disassembly techniques, economics and policy**. Florida center for solid and hazardous waste management. Disponível em: <<http://www.floridacenter.org/publications/kibert.pdf>>. Acesso em maio 2000.

KOEN, VAN D.; BOEDIANTO, P.; DORSTHORST, B.J.H. Te; KOWALCZYK, T. Strategy for reuse of construction and demolition waste role of authorities. **Heron**, v.46, n.2, p. 89-94, 2001 (publicado pela TNO Building and Construction Researchrijswijk e Netherlands School for Advanced Studies in Construction).

LAHUERTA, J.V.; MONTERDE, G.J.C. Estudio teórico y experimental sobre los morteros para muros resistentes de fábrica de ladrillo para la actualización de la Norma Básica MV 201-1972; 1.parte: memoria del estudio. **Materiales de Construccion**, v.34, n.196, p.33-41, 1984.

LANGUELL, J.L. **Development of a prototype assessment tool to evaluate the potencial to successfully implement deconstruction as a regional waste reduction**

strategy. Florida, 2001. Tese (Doutorado) - Department and Coastal Engineering, University of Florida.

LAURITZEN, E.K.; HANSEN, T. **Recycling of construction and demolition waste 1986 – 1995.** Denmark: Ministry of Environment and Energy, 1997.

LEVY, S.M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos.** São Paulo, 1997. 145p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concretos e alvenaria.** São Paulo, 2001. 194p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LIMA, J.A.R. Aggregate obtained from C&D waste recycling - proposition of specification for use in concrete. In: CIB SYMPOSIUM ON CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT – THEORY INTO PRACTICE, São Paulo, 2000. **Anais.** São Paulo. EPUSP, 2000.

LO, Y.; GAO, X.F.; JEARY, A.P. Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete. **Building and Environment.** n.34, p.759-764, 1999.

LUZ, A.B. da; POSSA, M.V.; ALMEIDA, S.L. **Tratamento de minérios.** 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM – Centro de tecnologia mineral e CNPq., 1998, 676 p.

MACAÉ ON LINE – PREFEITURA MUNICIPAL DE MACAÉ. **Reciclagem de entulho.** Disponível em: <http://www.macaee.rj.gov.br/inf_uteis/reciclagem.asp>. Acesso em março 2003.

McKINSEY & CO. **Empreendimentos sociais sustentáveis - como elaborar planos de negócio para organizações sociais.** São Paulo: Ashoka Empreendimentos Sociais e McKinsey & Co, 2001.

MÁQUINAS FURLAN LTDA. **Catálogo on line.** Disponível em: <<http://www.furlan.com.br>>. Acesso em março de 2003.

MARTINS NETO, A.A.A.; DJANIKIAN, J.G. **Aspectos de desempenho da argamassa dosada em central.** 1999 (Boletim técnico PCC n. 235).

- MEHUS, J.; PETKOVIC, G.; ENGELSEN, C.J.; KARLSEN, J.; LILLESTOL, B. Recycled aggregates a viable alternative for the Norwegian building and construction industry. In: SUSTAINABLE BUILDING, 2002. Oslo. **Proceedings**. Oslo. 2002.
- MESBAH, H.A.; BUYLE-BODIN, F. Efficiency of polypropylene and metallic fibers on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. **Construction and Buildings Materials**, 13. p.439-447.1999.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo, Editora Pini, 1994.
- MIRANDA, L.F.R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. São Paulo, 2000. 172p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Argamassas com entulho reciclado. **Técnica**, Pini. 74, p.68-71. Maio/Junho. 2003.
- MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. CDW recycled aggregate renderings: Part II - effect of thermal shock on the cracking and bond tensile strength of renderings. **Construction and Building Materials**, 2005 (no prelo).
- MOMBER, A.W. The fragmentation of cementitious composites in a jaw breaker. **Theoretical and applied fracture mechanics**, Elsevier. 38, p.151-164. 2002.
- MONTE, R. **Avaliação da influência dos aditivos incorporadores de ar nas propriedades das argamassas de revestimento**. Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana (Disciplina PCC 5016: Materiais e Componentes de Vedações e Acabamentos de Edifícios - Análise de Especificações normativas). 2001.
- MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**, 4. ed. John Wiley & Sons, Inc. 2001. 796p.
- MORAIS, F.L.; SELMO, S.M.S. **Estudo comparativo de fatores intervenientes na fissuração de revestimentos de argamassa de cimento e cal**. São Paulo, 1999. 89p. (Relatório Final - Iniciação Científica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- MOREL, A. et al. Practical guideline for the use of recycled aggregates in concrete in France and Spain. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY, 3., Odense, 1993. **Proceedings**. London, E & FN Spon, 1994. p.71-82. (RILEM Proceedings, 23).
- MORETTIN, P.A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. 5. ed. Ed. Saraiva. 2003.
- MORICONI, G.; MONOSI, S.; CORINALDESI, V. Recycled-aggregate mortars. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MORTARS TECHNOLOGY, 1., Florianópolis, 2005. **Anais**. Florianópolis, ANTAC, 2005. p. 45-52.
- MORICONI, G., CORINALDESI, V., ANTONUCCI, R., Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick. **Materials and Structures**, 36 (264), 2003, p.702-708.
- MÜLLER, A.; WIENKE, L. Measurements and models for the gravity concentration of C&D waste through jiggling. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, v1, Spain, 2004. **Proceedings**. Spain, RILEM Publications S.A.R.L, 2004. p. 115-122. (RILEM Proceedings PRO 40).
- NAKAKURA, E. H. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a MERUC**. São Paulo, 2003. 205p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- NASCIMENTO, R. A. **Aproveitamento da lama de resíduos minerais de construção em processos de produção de areia reciclada via úmida**. São Paulo, 2005. Exame de Qualificação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**, 2. ed., São Paulo: Pini, 1997.
- PAOLINI, M.; KHURANA, R. Admixtures for recycling of waste concrete. **Cement and concrete composites**, Elsevier. 20. p.221-229.1998.

- PEREZ, D. D. **Estudo sobre a influência da variabilidade do agregado miúdo reciclado em concretos de média resistência.** São Paulo, 2005. Relatório Final de Iniciação Científica FAPESP – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- PIETRA, I. F. D. **Avaliação do concreto com agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição reforçado com fibras de aço.** São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- PINTO, T.P.P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas.** São Carlos, 1986. 137p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PINTO, T.P.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** São Paulo, 1999. 189p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- POLISSENI, A. E. **Método de campo para avaliar a capacidade impermeabilizante de revestimentos de parede.** Porto Alegre, 1985. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Reciclagem de entulho da construção civil.** Disponível em: <<http://www.pbh.gov.br/limpeza-urbana/reciclaent.htm>>. Acesso em março 2003.
- PUT, J. Recycling of CDW: success factors. In: WORKSHOP RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E AS NORMAS TÉCNICAS PARA SUA UTILIZAÇÃO, São Paulo. **Anais.** São Paulo, SINDUSCON-SP, 2001.
- RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete Admixtures Handbook – Properties, Science and Technology.** 2.ed, New Jersey: Noyes Publications, 1995, 1153p.
- REGATTIERI, C.E.X. **Argamassas industrializadas x argamassas produzidas em obra: modelo de análise de custo** (Apresentação Power Point). Disponível em <http://abcp.org.br> Acesso em novembro 2002.
- ³RUCH, M.; SCHULTMANN, F.; SINDT, V.; RENTZ, O. Selective dismantling of buildings: state of the art and new developments in Europe. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Paris, 1997. **Proceedings.** Paris, CSTB, 1997. v.1, p. 433-40.

- ^bRUCH, M.; SCHULTMANN, F.; SINDT, V.; RENTZ, V.; O. Strategies for the quality improvement of recycling materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Paris, 1997. **Proceedings**, Paris, CSTB, 1997. v.1, p. 611-18.
- SABBATINI, F. H. Agregados miúdos para argamassas de assentamento. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., São Paulo, 1986. **Anais**. São Paulo, EPUSP, 1986. p. 17-25.
- SANTIN, E. Tijolo por tijolo, num desenho mágico. **Téchne**, v.4, n.23, p.18-24, jul./ago., 1996.
- SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas**. São Paulo: EPUSP, 1966.
- SCHOFIELD, C.G. **Homogenization / blending systems design and control for minerals processing :with fortran programs**. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech, 1980, 321p.
- SCHULZ, R. The processing of building rubble as concrete aggregate in Germany. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY, 3., Odense, 1993. **Proceedings**. London, E & FN Spon, 1994. p. 105-116 (RILEM Proceedings, 23).
- SEAR, L. K. A.; DEWS, J.; KITE, B.; HARRIS, F.C.; TROY, J.F. Abrams law, air and high water-to-cement ratios. **Construction and Buildings Materials**, v.10, n.3, p.221-226, 1996.
- SEELE, J.; GREVEN, H.; SELMO, S. M. S. **Unidade ascendente em paredes – panorama sobre o diagnóstico e as soluções de reparo**. 2004. 15 p. São Paulo, 2004. No prelo.
- SELMO, S.M.S. Agregados miúdos para argamassas de revestimento. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: AGREGADOS, 1., São Paulo, 1986. **Anais**. São Paulo, EPUSP, 1986. p.27-43.
- SELMO, S.M.S. Prevenção de patologia em revestimentos externos de argamassa dos edifícios: a importância dos serviços de manutenção. IN: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO, Porto Alegre, 1989. **Anais**. Porto Alegre, UFRGS, 1989. p.195-212.

- SELMO, S.M.S.; BUCHER, H.R.E. O saibro na formulação de argamassas de assentamento e revestimento: contribuição ao estabelecimento de critérios para dosagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 2., São Paulo, 1990. **Anais**. São Paulo, ABCP, 1990. v.2, p.477-96.
- SELMO, S.M.S. **Revestimentos de argamassas de paredes e tetos de edifícios: projeto, execução e manutenção**. São Paulo, ABCP, 1996. (Apostilas e Anexos de laboratório do Curso Intensivo de Argamassas de Assentamento e Revestimento – CIARE).
- SELMO, S.M.S. **Curso Avançado de Perícias em Revestimentos de Argamassa**. São Paulo, Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias, 2002. (Apostila)
- SELMO, S.M.S.; NAKAKURA, E.; MIRANDA, L.F.R.; MEDEIROS, M.H.F.; SILVA, C.O. **Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso**, 2002 (Boletim Técnico PCC 310).
- SHIROMA, C. S. **Estudo da influência da cura nas propriedades de argamassas de assentamento com areias recicladas contaminadas com gesso de construção**. São Paulo, 2005. Relatório Final de Iniciação Científica FAPESP – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- SIGA – Sistema de Informações do Gabinete do Prefeito. **Reciclagem do Entulho da Construção Civil**. Disponível em: <<http://www.pbh.gov.br/siga/limpeza/entulho.htm>>. Acesso em março 2003.
- SIMONS, B.P.; HENDERIECKX, F. Guidelines for demolition with respect to the reuse of building materials: guidelines and experiences in Belgium. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY, 3., Odense, 1993. **Proceedings**. London, E & FN Spon, 1994. p.25-34. (RILEM Proceedings, 23).
- SINDUSCON-SP. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil - A experiência do SINDUSCON-SP**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.sindusconsp.com.br>>. Acesso em junho 2005.

- SOUZA, U. E. L. de; FRANCO, L.S. **Subsídios para a opção entre: elevador ou grua, andaime facheiro ou balancim, argamassa industrializada ou produzida em obra.** São Paulo, EPUSP, 1997 (Boletim Técnico 176, PCC/USP).
- TAYLOR, G. D. **Construction materials.** Singapura: Longman Scientific & Technical, 1942.
- TOPÇU, I.B. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. **Cement and Concrete Research**, v.27, n.12, p.1817-1823. 1997.
- ULSEN, C.; KAHN, H. **Caracterização de resíduos de construção e demolição:** estudos de separabilidade. Relatório parcial FAPESP N° 02/00849-1. Setembro, 2002. 41p.
- UNIKOWSKI, Z. R. **Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment.** Paris, LCPC, 1982.
- VEIGA, M. R. Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5, São Paulo, 2001. **Anais.** São Paulo, ANTAC, 2001, p.43-. 2003.
- WEIMANN, K.; MÜLLER, A. Properties of building materials gained from wet-processed crushed concrete fines, v1, Spain, 2004. **Proceedings.** Spain, RILEM Publications S.A.R.L., 2004. p. 133-141. (RILEM Proceedings PRO 40).
- WERKEMA, M.C.C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos.** Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, 1995, 404p.
- WILBURN, D.R.; GOONAN, T.G. **Aggregates from natural and recycled sources: economic assessments for construction applications – a material flow analysis.** Washington, D. C.: U.S. Geological Survey, Circular 1176, 1998.
- WRIGHT *et al.* **Administração estratégica: conceitos.** São Paulo: Atlas, 2000.
- ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas, 1997. 140p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.