UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
Departamento de Engenharia de Construção Civil

GERUSA DE AGUIAR

**ESTUDO DE ARGAMASSAS COM
AGREGADOS RECICLADOS
CONTAMINADOS POR GESSO DE
CONSTRUÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2004

GERUSA DE AGUIAR

**ESTUDO DE ARGAMASSAS COM
AGREGADOS RECICLADOS
CONTAMINADOS POR GESSO DE
CONSTRUÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

Área de atuação:
Engenharia de Construção Civil

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

São Paulo
2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Aguiar, Gersa de
Estudo de argamassas produzidas com agregados
reciclados
contaminados por gesso de construção / G. de Aguiar. – ed.rev.
-- São Paulo, 2004.
282 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Argamassa (Propriedades) 2.Agregados (Reciclagem; Uso)
I.Universidade de São Paulo.Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Construção Civil II.t.

E ASSIM ELA VOA...

"Foi estabelecido cientificamente que a mamangava não pode voar. Sua cabeça é grande demais e suas asas pequenas demais para sustentar o corpo. Segundo as leis da aerodinâmica, ela simplesmente não poderia voar. Mas ninguém disse isso à mamangava. E assim ela voa..."

(Autor desconhecido)

***Para minha mãe,
por seu amor incondicional.***

***Para minha família e
meus verdadeiros amigos, que fizeram
o jugo parecer sempre mais leve.***

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Dr.^a Sílvia Maria de Souza Selmo, minha orientadora, que valorizou e apoiou a organização e interpretação dos resultados deste trabalho, com base em publicações recentes de especialistas no tema.

Ao Prof. Dr. Cláudio Sbrighi Neto, pelas suas sugestões e contribuições precisas na arguição deste trabalho.

À Prof.^a Dr.^a Maria Alba Cincotto, por todos os seus ensinamentos, principalmente nas aulas de pós-graduação.

À CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal, pelo fornecimento da bolsa de pesquisa.

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo suporte financeiro ao programa experimental.

Aos funcionários do Laboratório de Química dos Materiais do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Aos funcionários do CPqDCC – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Construção Civil do PCC – Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP.

Aos funcionários do LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica do PMI – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.

Aos funcionários do LMS – Laboratório de Mecânica dos Solos do PEF – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da EPUSP.

Aos funcionários do LEM - Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais do PEF – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

Aos funcionários da Biblioteca da Engenharia Civil, Secretaria de Pós Graduação do PCC – Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP.

À Carolina S. Shiroma, Patrícia Castanho Galeni e Mauricio Real dos Santos, pelo auxílio na realização dos ensaios.

Aos colegas das salas de pós-graduação: Asteróide, Olimpo e Buraco Negro, pela convivência.

Entre todas as pessoas com as quais eu convivi, existem algumas de quem eu não posso deixar de falar, pois merecem um agradecimento especial. Deste ponto em diante, os agradecimentos são prova do mais profundo carinho e reconhecimento.

No laboratório tem o Adilson Inácio, sempre humilde e pronto à ajudar nos trabalhos pesados, com aquele sorriso dizendo “Oi, minha querida”. O Seu João e o seu “Fala, menina”, que parou do lado daquela bancada em que eu estava desformando tantas vezes e com dó de mim me ajudou nessa enfadonha tarefa. O Reginaldo que, além dos conselhos técnicos, foi alguém com quem eu desabafei muitas vezes sobre as agruras deste mestrado. Mário Takeashi, que sempre transmitiu calma, tranquilidade, como se dissesse “isto vai passar”. E o Dorval, que estava lá agitando os churras, lembrando que é preciso beber de vez em quando, pra agüentar o tranco, mas que também me quebrou muitos galhos.

Nas salas de pós-graduação, agradecimentos especialíssimos para Manuel “Manolo” Grullon, que me ajudou tantas vezes mesmo sem eu pedir, principalmente com os terríveis abstracts; Juarez, que discutiu o texto comigo e me deixou mais confiante; Rui, com as temíveis DRX’s e Rita “Maria” Medeiros deu uma forcinha pros detalhes de formatação e “burocráticos”, mesmo estando em Natal.

Destas salas também vêm algumas pessoas que tornaram o dia-a-dia mais fácil e aqui acho que todo mundo sente um frio na barriga em esquecer de alguém, pois foi muita gente que chegou e que partiu durante esses quase três anos, mas aí vai: aos “meninos” Ângelo Just, Alúzio, Eduardo Ohashi, Stênio Brasil, Serginho, Cléber, Clóvis Nita, Charles, Paulo Barbosa, Tonhão, Mauricio Garcia, Odair, Renato, Rolando, Danilo Perez, André Nunes, Santovito, Tio Willian, Paulo Pereira, Dieguez, Yoakim, Palliari, Hudson, Julio Sabadini, Marcelo Medeiros, Flavio Maranhão e Daniel Pitelli e as “meninas” Luciana Oliveira, Claudinha, Fernanda Marchiori, Abla, Leila, Ana Luisa, Tatiana Cervo, Priscila, Ivie, Yuko, Patrícia, Manuela, Rosa, Jane, Fabiana Ribeiro, Fabiana Cleto, Kelly, Juliana Rego, Vanessa Massara, Carine, Andrea Pascale e Anna Maria.

Valeu estagiários show de bola, pena que você não estavam no meu time: Paula Ikematsu, Geisy e Carlos. A Patrícia Galeni então nem se fala, sempre com aquele sorriso meigo e aquela paciência me dizendo “Não fica assim” e me ajudando sempre que podia. E da iniciação científica veio a Carol Shiroma, que tanto me ajudou na fase em que uma simples medida de retração parecia uma tarefa de Hércules.

Entre os funcionários, carinho muito, muito especial para a Cris Solera, Fátima Simão, Vilma, Engracia, Fátima Regina, Paulinho e Seu Luis Alberto.

“Povo” do PEF, que me quebrou vários galhos e me convidou pra várias festas: Alex, Rui, Antonio “Juca”, Zé, Eduardo, Joaquim e Antonio.

No IPT, Valdecir Quarcioni e Daniel Aleixo, que tiveram tanto carinho com os meus ensaios e que me tiraram tantas dúvidas.

Entre os “guardas” da portaria da Civil estão o Seu Ademir, o Seu Fagundes, o Seu Felipe. E tantos da guarda universitária que me levaram de volta ao CRUSP de madrugada. E os porteiros do meu prédio no CRUSP sempre preocupando se estava tudo bem: Dona Alzira, Rosangela, Robson e Seu Hélio.

Aos colegas do Icq e Msn, companheiros da solidão da madrugada e dos finais de semana, conselheiros sentimentais e consultores de dúvidas sobre Word, Excel, principalmente Mneves e Mauricião. Sem tempo pra sair, essa é uma ótima opção pra “conhecer gente”.

E o povo da lanchonete, que além de matar nossa fome estavam lá tomando parte de nossa vida e nos incentivando: Ana Paula, Rose, Isabel, Jade, Jussara, Luis, Zé, Edivan e Seu Zé, com o seu divino queijo especial sem maionese e com bastante salada.

Sem falar no povo da dança, a “terapia” das poucas horas em que o mestrado era totalmente esquecido.

Querida médica de todas as especialidades, Nena.

Tem também aquelas pessoas que te ensinam como “não ser”, aquelas com as quais você convive porque não tem outra opção e a quem você tem que agradecer por te lembrarem daquilo em que você nunca quer se tornar.

Para Deus, que me ajudou a não perder totalmente a sanidade quando o inferno pareceu fichinha perto do que eu estava passando. Que foi meu refúgio e meu consolo, mesmo quando eu o procurava após longo tempo de ausência.

À Francine e a Sandra Bastos, maiores incentivadoras da minha vinda pra São Paulo.

À aqueles que eu conheci aqui e entraram para o meu seleto time de “amigos pra vida toda” que são Artemária, Tatiana Tuchiya, Auriciane, Andréia Nince, Luciana Peixoto e Cida Araújo. Pessoas que fazem você acreditar nos seus valores, nos seus ideais e com quem você pode ser você mesma, sempre. E aqui entra também o meu elo com a terrinha, Maira Tiguman, que São Paulo trouxe de vez pra este time.

Ao Omar, presente de Deus para a minha vida, que me fez voltar a viver e me dar todo o apoio de que eu precisava pra terminar esta jornada tão difícil, inclusive passando noite em claro me ajudando na impressão do trabalho, sempre dizendo “Calma, falta pouco, meu amor”.

Para meu irmão e minha avó, que sempre me deram força pra agüentar o tranco por aqui.

Para minha mãe, meu exemplo de vida. Mulher de fibra que sempre me apoiou, me deu força pra correr atrás, que sempre acreditou em mim. Quisera eu ter 10% de sua garra, minha adorada mãe.

ESTUDO DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS CONTAMINADOS POR GESSO DE CONSTRUÇÃO

RESUMO

Esta dissertação teve por objetivo iniciar investigações sobre os efeitos do uso de agregados reciclados contaminados por baixos teores de gesso de construção, em argamassas de assentamento de alvenarias. Na presença de umidade e por ação de minerais do gesso ou de outros mais complexos, que sejam formados, há riscos de fissuras, eflorescências e de deterioração progressiva dessas paredes. Um programa experimental foi realizado para a avaliação acelerada desses processos, por medidas de propriedades químicas, físicas e mecânicas de vinte argamassas. Materiais regionais usados em alvenarias e concreto na cidade de Socorro-SP foram escolhidos, pois lá existe uma usina de reciclagem, que produz areia reciclada para essas argamassas e com elevado teor de finos. Quatro agregados reciclados de granulometria muito fina e similar entre si foram artificialmente produzidos, por processos controlados de construção e demolição. Assim, estudou-se um agregado reciclado não contaminado (A1 com SO_3 igual a 0,2 %) e outros três idênticos, com previsão de contaminação progressiva (A2, A3 e A4, mas que resultaram com teor de SO_3 total da ordem de 0,5 % a 0,6 %). Quatro grupos de argamassas foram produzidos com variação do consumo de cimento (200, 150 e 100 kg/m^3), tipo de cimento (CP II e CP III) e ainda com e sem o uso de cal hidratada tipo CH III (teor elevado de carbonatos). O consumo de agregado reciclado anidro nas argamassas variou entre 1300 e 1200 kg/m^3 . Em cada grupo, foi ainda produzida uma argamassa mista, com areia muito pura e quartzosa, de granulometria e dosagem mais próximas às de argamassas normalizadas para alvenarias. A metodologia do programa baseou-se no envelhecimento acelerado das argamassas, a partir de 63 dias de idade e por ciclos de 7 dias em câmara úmida, alternados por 7 dias em estufa ventilada a 40 °C. Essa ciclagem foi adotada após criterioso levantamento bibliográfico e visando-se um processo holístico de deterioração preconizado por Collepardi (2003), inclusive para agregados reciclados contaminados por sulfatos. A partir de 63 dias de idade, foram então caracterizadas regularmente as seguintes propriedades das argamassas: resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulos de elasticidade estático e dinâmico. Durante a ciclagem, foram realizados ensaios complementares de termogravimetria e análise química quantitativa de sulfatos solúveis e de sais solúveis totais nas argamassas. Um conjunto de corpos-de-prova das argamassas permaneceu em câmara seca e foi também ensaiado a 175 dias, inclusive quanto à suscetibilidade a eflorescência. Entre 63 e 175 dias, foram realizados 8 ciclos de envelhecimento e conclui-se que a principal propriedade mecânica afetada durante a ciclagem foi a resistência à tração na flexão das argamassas e isto ocorreu a partir de 91 dias, nos quatro grupos de argamassas com agregado reciclado, sendo que entre 63 e 91 dias se quantificou uma evolução significativa de carbonatação pela termogravimetria. Os grupos de argamassas mistas com cimento e cal hidratada mostraram melhor desempenho neste estudo do que as argamassas simples de cimento e areia reciclada fina, inclusive quanto à eflorescência. Os resultados obtidos são restritos ao estudo de caso, mas permitem concluir que a contaminação de agregados reciclados para argamassas, por baixos teores de gesso de construção já foi suficiente para produzir alterações significativas no desempenho mecânico das argamassas e nos seus níveis de sulfatos solúveis, que foram alterados de forma coerente com a ciclagem e sendo possível a sua interpretação com base em teorias mais recentes de especialistas no tema. Por fim, o trabalho confirmou ser recomendável um limite máximo de sulfatos solúveis na faixa entre 0,1 % e 0,2 %, sobre a massa de agregados reciclados para argamassas. Estes níveis são preconizados por instituição alemã especializada em durabilidade de alvenarias. Concluiu-se que também pode ser adotado o critério da DIN 4226-100 ($< 600 \text{ mg/L de SO}_4$), compatível com a faixa citada.

A STUDY ON MORTARS PRODUCED WITH CDW RECYCLED AGGREGATES CONTAINING GYPSUM PLASTER AS IMPURITY

ABSTRACT

This is an abstract of a Master of Science project carried out at EPUSP, Universidade de São Paulo, Brazil, aimed at investigating the effects of the use of recycled aggregates contaminated by small contents of gypsum plaster on masonry mortars. In the presence of moisture and by the action of gypsum minerals or other more complex ones that may occur, there is the risk of the formation of cracks, efflorescence, and progressive deterioration of the masonry walls. An experimental program was thus developed for the rapid assessment of these processes by assessing the chemical, physical and mechanical properties of twenty mortar mixes. Local materials used for masonry and concrete in Socorro-SP, Brazil, were selected, as in that location there exists a recycling unit producing recycled sand for mortars with a high content of fines. Four recycled aggregates of very fine grain size and similar to each other were artificially produced by controlled construction, demolition and recycling processes. Thus a recycled, non-contaminated aggregate (A1, with SO_3 content equal to 0,2 %) and three other identical ones were studied, with expected progressive contamination (A2, A3 and A4, that result with a total SO_3 content about 0,5 % to 0,6 %). Four groups of mortars were thus produced with varying cement content (200, 150 and 100 kg/m^3), cement type (Brazilian CP II and CP III) and also with and without the use of a commercial hydrated lime, Brazilian type CH III (of a high carbonate filler content). The anhydrous recycled aggregate content in the mortars varied between 1300 and 1200 kg/m^3 . In each group a blended mortar was also produced, containing very pure quartzous sand, of grain size and mix proportions closer to standard masonry mortars. The approach followed in the experimental program was accelerated aging test of mortars, starting at 63 days of age and at 7 day cycles in the wet chamber, alternated by 7 days in the ventilated oven at 40 °C. This cycling was adopted after critical bibliographical research and under a holistic process of deterioration set up by Collepardi (2003), also for gypsum-contaminated aggregates. From 63 days of age, the following properties were regularly characterized for the mortars: flexural modulus (tensile strength in bending), compressive strength, and static and dynamic elasticity modulus. During cycling, complementary tests were done of thermogravimetric analysis and quantitative chemical analysis of total soluble sulphate in mortars. A number of the mortar test specimens was left in the dry chamber and tested at 175 days, including tendency to efflorescence. In between 63 and 175 days, 8 weathering cycles were done, and it was concluded that the main mechanical property affected during cycling was tensile strength in bending (indirect tensile strength) of mortars, and this occurred from 91 days, in the four groups of mortars containing recycled aggregates, and in between 63 and 91 days a significant evolution was measured of carbonation by thermogravimetry. The groups of mixed mortars with cement and hydrated lime showed better performance in this study than the plain cement and fine sand mortars, also as regards efflorescence. The results here obtained are to be seen as restricted to this case study, yet they allow us to conclude that the use of recycled aggregates containing even low levels of gypsum plaster as impurity in the production of mortars was sufficient to produce significant alterations in the mechanical performance, as well as the degree of soluble sulphate of mortars, that got altered in a way coherent with the cycling process, and it is possible to interpret this based on more recent theories by experts in the subject. Last, this work confirmed that it is advisable to look for a maximum soluble sulphate limit ranging from 0,1 % to 0,2 % by weight of recycled aggregates for mortars. Such levels was set up by a German institution specializing in masonry durability. It was also concluded that the requirements of DIN 4226-100 (< 600 mg/L of SO_4) can be used as appropriate in the range mentioned.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	IMPORTÂNCIA DO ESTUDO.....	3
1.1.1	Panorama das pesquisas acadêmicas sobre agregados reciclados....	3
1.1.2	Legislação e normas brasileiras atuais	5
1.1.3	Políticas de incentivo à implantação de usinas de reciclagem no Brasil	8
1.2	JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO	10
1.2.1	O gesso como contaminante nos resíduos de construção e demolição	10
1.2.2	Divergências nos critérios para o limite máximo de sulfatos solúveis em agregados.....	13
1.3	OBJETIVO DO ESTUDO	14
2	DETERIORAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS POR SULFATOS DE CÁLCIO	15
2.1	O GESSO DE CONSTRUÇÃO COMO FONTE PRINCIPAL DE ÍONS SULFATO EM AGREGADOS RECICLADOS.....	15
2.2	FORMAÇÃO DE ETRINGITA NOS COMPOSTOS DE CIMENTO PORTLAND	18
2.2.1	Etringita primária e monossulfoaluminato.....	18
2.2.2	Etringita tardia.....	21

2.3	ALTERAÇÕES POSSÍVEIS NA MICROESTRUTURA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS POR ETRINGITA TARDIA	23
2.4	DETERIORAÇÃO POR CONTAMINAÇÃO POR SULFATOS DE ORIGEM INTERNA	27
2.4.1	Situações e mecanismos possíveis de ocorrência.....	28
2.4.2	Mecanismo holístico de deterioração.....	29
2.5	LIMITES NORMALIZADOS PARA SULFATOS SOLÚVEIS EM AGREGADOS.....	31
2.6	DANOS POR SAIS DE SULFATO EM ALVENARIAS SUJEITAS À AÇÃO SIMULTÂNEA DE UMIDADE	33
2.7	PESQUISAS RECENTES SOBRE A AÇÃO DE SULFATOS E OUTROS SAIS SOLÚVEIS EM CONCRETOS E ARGAMASSAS	36
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	41
3.1	OBJETIVOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
3.2	RESUMO DA METODOLOGIA	43
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	47
3.3.1	Cimentos	47
3.3.2	Cal hidratada	47
3.3.3	Agregados reciclados	48
3.3.4	Agregado com areia normal brasileira (AN).....	60
3.4	PROPORCIONAMENTO DAS ARGAMASSAS	62
3.4.1	Com os agregados reciclados	62
3.4.2	Com areia normal brasileira	63
3.5	IDENTIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS	63
3.6	METODOLOGIA DE MOLDAGEM DAS ARGAMASSAS.....	65
3.6.1	Definição da água de mistura das argamassas	65
3.6.2	Método de mistura das argamassas	65
3.6.3	Preenchimento das fôrmas e adensamento.....	66

3.6.4	Cura inicial das argamassas	67
3.6.5	Ciclos de umedecimento e secagem.....	68
3.7	RESUMOS DOS ENSAIOS REALIZADOS E MÉTODOS EMPREGADOS	69
3.8	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO PLÁSTICO	70
3.8.1	Índice de consistência	70
3.8.2	Densidade de massa aparente.....	70
3.8.3	Consumo de materiais e custo estimado por m ³	70
3.9	CARACTERIZAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS AOS 63 DIAS DE IDADE	71
3.9.1	Fluorescência de Raios-X e termogravimetria.....	72
3.9.2	Teor de sais solúveis totais e de sulfatos solúveis.....	72
3.9.3	Resistência à tração na flexão	73
3.9.4	Resistência à compressão simples.....	74
3.9.5	Módulo de elasticidade estático	74
3.9.6	Módulo de elasticidade dinâmico.....	75
3.9.7	Absorção de água	77
3.9.8	Densidade de massa aparente no estado endurecido.....	77
3.10	CARACTERIZAÇÃO DURANTE A CICLAGEM DAS ARGAMASSAS	78
3.11	CARACTERIZAÇÃO FINAL DAS ARGAMASSAS AOS 175 DIAS DE IDADE.....	79
3.11.1	Ensaio mecânicos nas argamassas cicladas e não cicladas.....	79
3.11.2	Análise da susceptibilidade à formação de eflorescências.....	80
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	82
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	82
4.1.1	Aglomerantes	82
4.1.2	Agregados reciclados	86

4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO PLÁSTICO	97
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE 63 A 175 DIAS DE IDADE.....	100
4.3.1	Densidade, absorção de água e porosidade aparente	100
4.3.2	Composição química.....	101
4.3.3	Teor de sais solúveis totais e de sulfatos solúveis.....	102
4.3.4	Análise da termogravimetria	105
4.3.5	Susceptibilidade à formação de eflorescência.....	126
4.3.6	Resistência à tração na flexão	128
4.3.7	Resistência à compressão simples.....	133
4.3.8	Módulos de elasticidade estático e dinâmico	138
4.3.9	Estabilidade dimensional	147
5	DISCUSSÃO FINAL	151
5.1	EFEITOS DA CICLAGEM NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DAS ARGAMASSAS	151
5.1.1	Análise dos teores de sulfatos solúveis e sais solúveis totais.....	151
5.1.2	Análise geral das curvas DTG por argamassa.....	153
5.2	EFEITO DA CICLAGEM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS	155
5.2.1	Resistência à tração na flexão	155
5.2.2	Resistência à compressão simples.....	158
5.2.3	Módulo de elasticidade (estático e dinâmico).....	161
5.3	INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS NÃO CICLADAS FRENTE ÀS CICLADAS	167
5.3.1	Com relação às propriedades físicas e mecânicas.....	167
5.3.2	Com relação às propriedades químicas	168
5.4	ANÁLISE CONJUNTA DAS PROVÁVEIS ALTERAÇÕES NA MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS	169
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	173

6.1	CONCLUSÕES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	173
6.1.1	Quanto à contaminação por sulfatos nos agregados reciclados ...	173
6.1.2	Quanto aos efeitos principais dos ciclos de umedecimento e secagem	173
6.1.3	Quanto às alterações nas propriedades químicas e microestrutura das argamassas	174
6.1.4	Quanto aos ensaios de resistência mecânica	175
6.1.5	Quanto à estabilidade dimensional.....	176
6.1.6	Quanto à influência do tipo de cimento	177
6.1.7	Quanto à adição de cal nas argamassas com agregado reciclado.	177
6.1.8	Quanto às proporções em massa e consumo de cimento das argamassas.....	178
6.2	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	179
7	ANEXOS	181
7.1	RELAÇÕES DE VOLUME E MASSA NAS PAREDES GERADORAS DOS AGREGADOS	181
7.2	CARACTERIZAÇÃO DO GESSO DE CONSTRUÇÃO APLICADO COMO REVESTIMENTO NOS PÓRTICOS USADOS NA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS REICLADOS	183
7.3	RESULTADOS DA GRANULOMETRIA A LASER DOS AGLOMERANTES E AGREGADOS	185
7.4	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA NORMAL BRASILEIRA.....	196
7.5	ANÁLISES POR DRX DOS AGLOMERANTES E AGREGADOS EMPREGADOS NAS ARGAMASSAS	197
7.6	DETERMINAÇÕES NO IPT PARA TEORES DE SO ₃ , SULFATOS E SAIS SOLÚVEIS TOTAIS	204

7.7	CURVAS DTG DAS ARGAMASSAS – IDENTIFICAÇÃO E INTERPRETAÇÃO BÁSICA DE ALGUNS PICOS.....	222
7.7.1	Grupo G6 – Argamassas T1 a T5.....	222
7.7.2	Grupo G9 – Argamassas T6 a T10.....	230
7.7.3	Grupo G12 – Argamassas T11 a T15.....	237
7.7.4	Grupo G12F – Argamassas T16 a T20	245
7.7.5	Características da termogravimetria.....	247
7.8	RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS ARGAMASSAS	253
7.9	CORRELAÇÃO ENTRE MÓDULO DINÂMICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	263
7.10	MEDIDAS DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL EM CORPOS-DE-PROVA DE ARGAMASSAS SIMILARES AS DESTE ESTUDO. (SHIROMA, 2004)	268
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	270

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Aplicações de argamassas produzidas com agregado reciclado em Socorro (SP): (a) e (b) assentamento de alvenarias; (c) revestimento de parede, na foto com espera para fiação elétrica e (d) fachada de uma das obras. _____ 9
- Figura 1.2 – Resíduos de gesso retirados dos resíduos de construção coletados em caçambas, na usina de reciclagem Irmãos Preto Ltda., em Socorro (SP). ____ 11
- Figura 2.1 – Diagrama de fases da formação do AFt e AFm. (Adaptado de Taylor, 1997) _____ 19
- Figura 2.2 – Produtos da hidratação do cimento x tempo. (Locher; Richartz; Sprung, 1976 apud Djanikian, 1987) _____ 20
- Figura 2.3 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita formados pela mistura de soluções de aluminato de cálcio e de sulfato de cálcio. (Mehta, 1994) ____ 24
- Figura 2.4 – Representação esquemática da pressão causada nos poros devido à transformação do monossulfoaluminato em etringita. (Adaptado de Taylor; Famy; Scrivener, 2001) _____ 24
- Figura 2.5 – Troca de íons SO_4^{-2} por CO_3^{-2} na estrutura cristalina do monossulfoaluminato. (Kuzel, 1996) _____ 26
- Figura 2.6 – Influência do CO_2 nas reações de hidratação do C_3A em cimentos Portland. (Adaptado de Kuzel, 1996) _____ 26
- Figura 2.7 - Elementos necessários para a ocorrência de ataque por sulfatos internos – AIS. (Adaptado de Collepari, 2003) _____ 30
- Figura 2.8 - Eflorescências esbranquiçadas: as anomalias mais comuns causadas por sais solúveis em materiais de construção. (Foto de J. Seele) _____ 36
- Figura 3.1 – Fluxograma representativo do programa experimental. _____ 46
- Figura 3.2 – Esquema do pórtico base para produção dos agregados reciclados. ____ 49
- Figura 3.3 – Pórticos construídos para a produção do agregado reciclado. _____ 50

Figura 3.4 – Aplicação de revestimento de gesso nos pórticos. _____	50
Figura 3.5 – Britador usado na produção dos agregados reciclados. _____	51
Figura 3.6 – Agregados reciclados após moagem e homogeneização. _____	52
Figura 3.7 – Análise termogravimétrica de etringita sintética. (Adaptado de Perkins;Palmer, 1999), _____	56
Figura 3.8 – Ensaio semiquantitativo de sulfatos, através de método rápido do IGS, da Alemanha, e adaptado por Selmo <i>et al.</i> (2004). _____	58
Figura 3.9 - Corpos-de-prova de 4 cm x 4 cm x 16 cm aos 63 dias de idade. _____	71
Figura 3.10 - Ensaio de resistência à tração na flexão aos 63 dias de idade, em corpos-de-prova 4 cm x 4 cm x 16 cm. _____	73
Figura 3.11 – Ensaio de resistência à compressão aos 63 dias de idade, em meio prisma com dimensões aproximadas de 4 cm x 4 cm x 8 cm. _____	74
Figura 3.12 – Ensaio de módulo de elasticidade estático aos 63 dias de idade, em meio prisma com dimensões aproximadas de 4 cm x 4 cm x 8 cm. _____	75
Figura 3.13 – Aplicação de ultra-som para cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, aos 63 dias de idade, em prismas 4 cm x 4 cm x 16 cm. _____	76
Figura 3.14 – Medida de variação dimensional, em prismas 4 cm x 4 cm x 16 cm. _____	79
Figura 3.15 – Esquema representativo do ensaio de eflorescência adaptado de Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003): (a) vista lateral; (b) vista frontal e (c) planta. _____	81
Figura 4.1 – Curvas TG e DTG do cimento CP III 32 RS. _____	83
Figura 4.2 – Curvas TG e DTG do cimento CP II F 32 _____	84
Figura 4.3 – Curvas TG e DTG da cal hidratada CH III. _____	86
Figura 4.4 – Composição granulométrica dos agregados reciclados produzidos. _____	88
Figura 4.5 – Curvas TG e DTG do agregado reciclado A1. _____	90
Figura 4.6 – Curvas TG e DTG do agregado reciclado A2. _____	90
Figura 4.7 – Curvas TG e DTG do agregado reciclado A3. _____	90

Figura 4.8 – Curvas TG e DTG do agregado reciclado A4. _____	91
Figura 4.9 – Curvas TG e DTG dos agregados reciclados. _____	92
Figura 4.10 – Sulfatos solúveis e sais solúveis totais nos agregados reciclados, determinados pelo IPT. _____	94
Figura 4.11 – Teor de anidrido sulfúrico nos agregados reciclados (SO_3 total), comparativo à fração de sulfato solúvel, calculada em SO_3 . _____	94
Figura 4.12 – Curvas TG e DTG das argamassas após 63 dias – Grupo G6. _____	105
Figura 4.13 – Curvas TG e DTG das argamassas após 91 dias – Grupo G6. _____	106
Figura 4.14 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias – Grupo G6. _____	106
Figura 4.15 – Curvas DT e DTG das argamassas após 175 dias NC – Grupo G6. _____	107
Figura 4.16 – Curvas TG e DTG das argamassas após 63 dias – Grupo G9. _____	107
Figura 4.17 – Curvas TG e DTG das argamassas após 91 dias – Grupo G9. _____	108
Figura 4.18 – Curvas DT e DTG das argamassas após 175 dias – Grupo G9. _____	108
Figura 4.19 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias NC – Grupo G9. _____	109
Figura 4.20 – Curvas TG e DTG das argamassas após 63 dias – Grupo G12. _____	109
Figura 4.21 – Curvas TG e DTG das argamassas após 91 dias – Grupo G12. _____	110
Figura 4.22 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias – Grupo G12. _____	110
Figura 4.23 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias NC – Grupo G12. _____	111
Figura 4.24 – Curvas TG e DTG das argamassas após 63 dias – Grupo G12F. _____	111
Figura 4.25 – Curvas TG e DTG das argamassas após 91 dias – Grupo G12F. _____	112
Figura 4.26 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias – Grupo G12F. _____	112
Figura 4.27 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias NC – Grupo G12F. _____	113
Figura 4.28 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas de 30 °C até 80 °C. _____	115

Figura 4.29 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 80 °C e 125 °C. _____	116
Figura 4.30 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 125 °C e 180 °C. _____	119
Figura 4.31 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 400 °C e 550 °C. _____	120
Figura 4.32 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 550 °C e 800 °C. _____	123
Figura 4.33 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 800 °C e 1000 °C. _____	124
Figura 4.34 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 80 °C e 1000 °C. _____	125
Figura 4.35 – Exemplos de classificação da formação de eflorescência: (a) sem ocorrência; (b) baixa formação; (c) média formação; (d) alta formação. ____	126
Figura 4.36 – Grupo G6 – Resistência à tração na flexão média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____	129
Figura 4.37 – Grupo G9 – Resistência à tração na flexão média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____	130
Figura 4.38 – Grupo G12 – Resistência à tração na flexão média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____	131
Figura 4.39 – Grupo G12F – Resistência à tração na flexão média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____	132
Figura 4.40 – Grupo G6 – Resistência à compressão simples média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____	134
Figura 4.41 – Grupo G9 – Resistência à compressão simples médio (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____	135
Figura 4.42 – Grupo G12 – Resistência à compressão simples média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____	136

- Figura 4.43 – Grupo G12F – Resistência à compressão simples média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____ 137
- Figura 4.44 – Grupo G6 – Módulo de elasticidade estático médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias e (c) 175 dias. _____ 139
- Figura 4.45 – Grupo G6 – Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____ 140
- Figura 4.46 – Grupo G9 – Módulo de elasticidade estático médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias e (c) 175 dias. _____ 141
- Figura 4.47 – Grupo G9 – Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____ 142
- Figura 4.48 – Grupo G12 – Módulo de elasticidade médio estático médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias e (c) 175 dias. _____ 143
- Figura 4.49 – Grupo G12 – Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____ 144
- Figura 4.50 – Grupo G12F – Módulo de elasticidade estático médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias e (c) 175 dias. _____ 145
- Figura 4.51 – Grupo G12F – Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias. _____ 146
- Figura 4.52 – Variação dimensional média das argamassas cicladas com relação ao comprimento aos 63 dias de idade (mm): (a) G6; (b) G9; (c) G12 e (d) G12F. _____ 149
- Figura 4.53 – Variação dimensional média das argamassas não cicladas com relação ao comprimento aos 63 dias de idade (mm): (a) G6; (b) G9; (c) G12 e (d) G12F. _____ 150
- Figura 5.1 – Sulfatos solúveis nas argamassas. _____ 152
- Figura 5.2 – Sais solúveis totais nas argamassas. _____ 153
- Na faixa de temperatura dos carbonatos, verificou-se que para 15 das 16 argamassas com agregado reciclado houve aumento da decomposição de

carbonato em temperaturas mais baixas (650 °C a 700 °C), conforme o aumento de idade das argamassas. Isto apenas não se verificou apenas para a argamassa T17, na Figura 5.3. _____	154
Figura 5.4 – Variação percentual da resistência à tração na flexão com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade. _____	156
Figura 5.5 – Variação da resistência à tração na flexão com relação à respectiva argamassa de A1 em cada grupo e idade. _____	157
Figura 5.6 – Variação percentual da resistência à compressão com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade. _____	159
Figura 5.7 – Variação da resistência à compressão simples com relação à respectiva argamassa de A1 em cada grupo e idade. _____	160
Figura 5.8 – Variação percentual do módulo de elasticidade estático com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade. _____	162
Figura 5.9 – Variação percentual do módulo de elasticidade dinâmico com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade. _____	163
Figura 5.10 – Variação do módulo de elasticidade estático com relação à respectiva argamassa de A1 em cada grupo e idade. _____	164
Figura 5.11 – Variação do módulo de elasticidade dinâmico com relação à respectiva argamassa de A1 em cada grupo e idade. _____	165
Figura 5.12 – Variação da densidade das argamassas com relação com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade. _____	166
Figura 7.1 – Gesso de construção utilizado como revestimento das paredes. ____	183
Figura 7.2 – Curvas TG e DTG do gesso de construção usado nos pórticos geradores de A2, A3 e A4. _____	183
Figura 7.3 – Granulometria a laser – Gesso de construção usado nos pórticos geradores de A2, A3 e A4. _____	184
Figura 7.4 – Granulometria a laser – Cimento CP III 32 RS. _____	185
Figura 7.5 – Granulometria a laser – Cimento CP II F 32. _____	186

Figura 7.6 – Granulometria a laser – Cal hidratada CH III.	187
Figura 7.7 – Granulometria a laser em água – A1.	188
Figura 7.8 – Granulometria a laser em álcool– A1.	189
Figura 7.9 – Granulometria a laser em água – A2.	190
Figura 7.10 – Granulometria a laser em álcool– A2.	191
Figura 7.11 – Granulometria a laser em água – A3.	192
Figura 7.12 – Granulometria a laser em álcool– A3.	193
Figura 7.13 – Granulometria a laser em água – A4.	194
Figura 7.14 – Granulometria a laser em álcool– A4.	195
Figura 7.15 – Análise por DRX do cimento CP III 32 RS.	197
Figura 7.16 – Análise por DRX do cimento CP II F 32.	198
Figura 7.17 – Análise por DRX da cal hidratada CH III.	199
Figura 7.18 – Análise por DRX do agregado reciclado A1.	200
Figura 7.19 – Análise por DRX do agregado reciclado A2.	201
Figura 7.20 – Análise por DRX do agregado reciclado A3.	202
Figura 7.21 – Análise por DRX do agregado reciclado A4.	203
Figura 7.22 – Curvas TG e DTG – Argamassa T1.	225
Figura 7.23 – Curvas TG e DTG – Argamassa T2.	226
Figura 7.24 – Curvas TG e DTG – Argamassa T3.	227
Figura 7.25 – Curvas TG e DTG – Argamassa T4.	228
Figura 7.26 – Curvas TG e DTG – Argamassa T5.	229
Figura 7.27 – Curvas TG e DTG – Argamassa T6.	232
Figura 7.28 – Curvas TG e DTG – Argamassa T7.	233
Figura 7.29 – Curvas TG e DTG – Argamassa T8.	234
Figura 7.30 – Curvas TG e DTG – Argamassa T9.	235

Figura 7.31 – Curvas TG e DTG – Argamassa T10. _____	236
Figura 7.32 – Curvas TG e DTG – Argamassa T11. _____	240
Figura 7.33 – Curvas TG e DTG – Argamassa T12. _____	241
Figura 7.34 – Curvas TG e DTG – Argamassa T13. _____	242
Figura 7.35 – Curvas TG e DTG – Argamassa T14. _____	243
Figura 7.36 – Curvas TG e DTG – Argamassa T15. _____	244
Figura 7.37 – Curvas TG e DTG – Argamassa T16. _____	248
Figura 7.38 – Curvas TG e DTG – Argamassa T17. _____	249
Figura 7.39 – Curvas TG e DTG – Argamassa T18. _____	250
Figura 7.40 – Curvas TG e DTG – Argamassa T19. _____	251
Figura 7.41 – Curvas TG e DTG – Argamassa T20. _____	252
Figura 7.42 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – 63 dias: (a) A1; (b) A2; (c) A3 e (d) A4. _____	264
Figura 7.43 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – 91 dias: (a) A1; (b) A2; (c) A3 e (d) A4. _____	265
Figura 7.44 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – 119 dias: (a) A1; (b) A2; (c) A3 e (d) A4. _____	266
Figura 7.45 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – 175 dias: (a) A1; (b) A2; (c) A3 e (d) A4. _____	267
Figura 7.46 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – AN: (a) 63; (b) 91; (c) 119 e (d) 175 dias. _____	268
Figura 7.47 – Estabilidade dimensional T2. (Shiroma, 2004) _____	268
Figura 7.48 – Estabilidade dimensional T3. (Shiroma, 2004) _____	268
Figura 7.49 – Estabilidade dimensional T4. (Shiroma, 2004) _____	269
Figura 7.50 – Estabilidade dimensional T6. (Shiroma, 2004) _____	269
Figura 7.51 – Estabilidade dimensional T7. (Shiroma, 2004) _____	269

Figura 7.52 – Estabilidade dimensional T8. (Shiroma, 2004)	269

LISTA DE FIGURAS

Tabela 1.1 – Pesquisas nacionais recentes abordando o tema reciclagem de resíduos de construção. (Fonte: www.reciclagem.pcc.usp.br)	4
Tabela 2.1 – Terminologia e características das fases mineralógicas dos materiais derivados de sulfato de cálcio. (Adaptado de: Wirsching, 1985 apud Selmo, 1997)	17
Tabela 2.2 – Termos associados às formas de etringita em pastas de cimentos Portland. (Adaptado de Odler, 1997)	22
Tabela 2.3 – Limites de sulfatos para agregados em mistura com cimento Portland.	32
Tabela 2.4 – Níveis de contaminação e danos esperados para a ação de sulfatos, em materiais de construção, por critérios do IGS. (Seele; Greven; Selmo, 2004)	35
Tabela 2.5 – Pesquisas recentes sobre os efeitos da presença de íons sulfato em concretos e argamassas.	38
Tabela 3.1 – Pórticos geradores dos agregados reciclados produzidos.	51
Tabela 3.2 – Agregados reciclados produzidos.	52
Tabela 3.3 – Ensaio de caracterização dos agregados reciclados.	53
Tabela 3.4 – Faixas de temperatura consideradas neste trabalho para análise básica das curvas TG.	55
Tabela 3.5 – Interpretação dos teores de sulfato determinados através do kit IGS alemão. (Adaptado de Selmo <i>et al.</i> , 2004)	57
Tabela 3.6 – Porcentagem média de agregado reciclado retida nas peneiras.	61
Tabela 3.7 – Porcentagem média de agregado reciclado retido nas peneiras de mesma granulometria da areia normal brasileira.	61
Tabela 3.8 – Composição granulométrica utilizada para o agregado AN.	61
Tabela 3.9 – Exemplo de composição granulométrica para 6 kg de agregado AN.	62

Tabela 3.10 – Detalhamento das argamassas moldadas para desenvolvimento do estudo.	64
Tabela 3.11 – Descrição da utilização dos corpos-de-prova da amassada 1.	67
Tabela 3.12 – Descrição da utilização dos corpos-de-prova da amassada 2.	67
Tabela 3.13 – Ensaios realizados para estudo das argamassas.	70
Tabela 3.14 – Ensaios realizados durante a ciclagem das argamassas.	78
Tabela 4.1.– Cimento CP III 32 RS - Análise química por FRX. (% de massa)	82
Tabela 4.2.– Cimento CP II F 32 - Análise química por FRX. (% de massa)	84
Tabela 4.3.– Cal hidratada CH III - Análise química por FRX. (% de massa)	85
Tabela 4.4 – Outras características dos aglomerantes utilizados nas argamassas.	86
Tabela 4.5 – Caracterização física dos agregados reciclados.	87
Tabela 4.6 – Análise química por FRX dos agregados reciclados. (% de massa)	89
Tabela 4.7 – Resultados extraídos da curva TG dos agregados reciclados.	92
Tabela 4.8 – Sulfatos solúveis, pH e condutividade em soluções filtradas nos tempos indicados. (Selmo et al, 2004)	96
Tabela 4.9 – Caracterização das argamassas no estado plástico.	98
Tabela 4.10 – Consumos por m ³ e estimativa de custos das argamassas.	99
Tabela 4.11 – Caracterização inicial das argamassas no estado endurecido.	101
Tabela 4.12.– Análise química por FRX das argamassas após ensaios aos 63 dias de idade. (óxidos, em % de massa)	103
Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios de sulfatos solúveis e de sais solúveis. (conforme item 4.3.3)	104
Tabela 4.14 – Análise da formação de eflorescência nas argamassas.	127
Tabela 7.1 – Análise química quantitativa por FRX. (% de massa)	183
Tabela 7.2 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Cimento CP III 32 RS.	197

Tabela 7.3 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Cimento CP II F 32.	198
Tabela 7.4 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Cal hidratada CH III.	199
Tabela 7.5 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Agregado reciclado A1.	200
Tabela 7.6 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Agregado reciclado A2.	201
Tabela 7.7 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Agregado reciclado A3.	202
Tabela 7.8 – Fichas mineralógicas compatíveis com a DRX – Agregado reciclado A4.	203
Tabela 7.9.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 63 dias de idade.	253
Tabela 7.10.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 91 dias de idade.	255
Tabela 7.11.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 119 dias de idade.	257
Tabela 7.12.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 175 dias de idade.	259
Tabela 7.13.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 175 dias de idade – não cicladas.	261

1 INTRODUÇÃO

Os trabalhos acadêmicos com argamassas de agregados reciclados no Brasil sempre foram pontuais e se iniciaram com Pinto (1986). As contribuições que se seguiram foram dadas por Sbrighi Neto; Hamassaki (1994), Sbrighi Neto; Hamassaki (1995), Hamassaki; Sbrighi Neto; Florindo (1996) e Levy (1997).

Em 1998, no Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pesquisas focando metodologia de dosagem e desempenho de revestimentos com agregados reciclados, em condições críticas de exposição em ambientes externos foram iniciadas, como tratado na dissertação de Miranda (2000), entre outras publicações.

Na época, avaliou-se então que a pesquisa de Miranda (2000) deveria englobar o estabelecimento de uma metodologia de produção de argamassas em usinas de reciclagem, e o trabalho evoluiu para o projeto de doutorado de Miranda (2001) e o Auxílio à Pesquisa FAPESP de Selmo (2001), os quais motivaram esta dissertação, através da cooperação tecnológica independente com a Usina de Reciclagem Irmãos Preto Ltda., em Socorro (SP).

Como as metas da pesquisa de Selmo (2001) estão associadas à reprodução da metodologia para outras usinas de reciclagem, fez parte do trabalho inicial o incentivo a empresários para investirem em usinas de reciclagem de maior porte. Isto foi discutido e proposto em um Plano de Negócio Social, promovido pelo Instituto de Cidadania Empresarial (ICE), e que foi dirigido pela orientadora desta pesquisa para a produção de areia reciclada para argamassas.

O resultado do trabalho acima foi divulgado por Miranda; Selmo (2003), seguindo a idéia de que não é possível produzir argamassas sem agregados de boa qualidade, como resumido em Selmo (1987) e apontado desde Cincotto (1983), entre muitos outros trabalhos que depois se seguiram.

Ao final da década de 90, outros pesquisadores incentivaram a difusão da produção de argamassas com agregados reciclados como feito pelo livro Reciclagem de

entulho para a produção de materiais de construção, escrito por vários autores e organizado por Cassa; Carneiro; Brum (2001).

Perseguindo-se a necessidade de se estabelecer parâmetros para o controle de qualidade de areia reciclada, o presente trabalho teve por meta iniciar no meio acadêmico as discussões de um dos prováveis riscos no uso de agregados reciclados em argamassas, que é a sua contaminação por gesso de construção.

Se junta a isto o fato de que o conceito de construção sustentável precisa ser firmado na comunidade acadêmica e na indústria de materiais de construção civil em geral. Assim, há a necessidade de se estudar melhor os processos de deterioração dos materiais de construção.

Os estudos experimentais desenvolvidos neste trabalho focaram argamassas de assentamento de alvenarias, pois a deterioração por sulfatos poderá gerar problemas de durabilidade, desempenho e custos de recuperação de paredes em contato com umidade. Também porque, dentre os usos de agregados reciclados em argamassas, é mais comum a sua aplicação como assentamento de alvenarias do que como revestimento de paredes.

Esta pesquisa foi viabilizada pela FAPESP e pela CAPES, através do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, além da parceria tecnológica com a Usina de Reciclagem Irmãos Preto Ltda., de Socorro (SP).

O leitor deste trabalho encontrará aqui sugestões de bibliografia e de possíveis metodologias e técnicas experimentais para se aprofundar no tema. Os resultados são relativos a um estudo de caso com condições pré-estabelecidas, havendo a possibilidade de ser avaliado para outras usinas de reciclagem ou condições de produção dos agregados reciclados.

1.1 Importância do estudo

1.1.1 Panorama das pesquisas acadêmicas sobre agregados reciclados

A crescente preocupação com o meio ambiente e a adoção do conceito de desenvolvimento sustentável¹ pela indústria da construção civil, aliadas à escassez de jazidas de agregados naturais, ao elevado consumo energético requerido para o beneficiamento destes agregados e ao problema de espaço para a disposição final dos resíduos sólidos nos meios urbanos são alguns dos fatores que vêm determinando o crescente aumento de estudos para utilização de agregados reciclados na produção de concretos e argamassas.

Dentre os fatores citados, o uso de agregados reciclados na Engenharia Civil é incentivado principalmente pela necessidade de solução para o problema do grande volume de resíduos do setor da construção civil, causadores de um impacto ambiental muito significativo.

Além disso, a otimização e o uso racional de materiais são sinônimos de economia, o que neste setor significa aumento de competitividade e pode levar à gradativa incorporação do conceito de desenvolvimento sustentável à indústria da construção civil.

A reciclagem de resíduos da construção civil é uma das condições básicas para se atingir o desenvolvimento sustentável no setor da construção civil, como citado por John (2000), por exemplo. Ainda mais quando se sabe que este setor consome entre 14% e 50% dos recursos naturais extraídos no planeta (Sjöström, 1996 *apud* John, 2000) e é o maior gerador de resíduos finais entre os macro-setores da economia.

O tema resíduos de construção e demolição tem sido abordado em trabalhos de pesquisa de várias instituições de ensino superior renomadas, sendo assunto de várias dissertações e teses nos últimos anos, como mostra a Tabela 1.1.

---

¹ Desenvolvimento sustentável é aquele que consegue usar os recursos naturais disponíveis para atender às necessidades das gerações presentes sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem às suas necessidades.

Tabela 1.1 – Pesquisas nacionais recentes abordando o tema reciclagem de resíduos de construção. (Fonte: www.reciclagem.pcc.usp.br)

Autor	Ano	Abordagem	Grau	Instituição
Aguiar	2004	Uso de agregados reciclados em argamassa – Contaminação por gesso de construção	Dissertação	PCC - USP
Perez	2004	Uso de agregados reciclados miúdos em concreto – Variabilidade	Iniciação científica	PCC - USP
Zordan	2003	Potencial de reciclagem de resíduos	Tese	PCC - USP
Buttler	2003	Uso de agregados reciclados em concreto – Idade da reciclagem	Dissertação	EESC - USP
Altheman	2002	Uso de agregados reciclados em concreto – Durabilidade	Iniciação científica	UNICAMP
Oliveira	2002	Reciclagem de resíduos de concreto	Tese	UNESP
Leite	2001	Uso de agregados reciclados em concreto – Propriedades mecânicas	Tese	UFRGS
Levy	2001	Uso de agregados reciclados em concreto – Durabilidade	Tese	PCC - USP
Souza	2001	Produção de blocos de concreto com agregado reciclado	Dissertação	UNB
John	2000	Metodologia de pesquisa para a reciclagem de resíduos	Livre docência	PCC - USP
Miranda	2000	Uso de agregados reciclados em argamassa de revestimento	Dissertação	PCC - USP
Angulo	2000	Variabilidade de agregados graúdos	Dissertação	PCC - USP
Pinto	1999	Gestão de resíduos sólidos da construção urbana	Tese	PCC - USP
Lima	1999	Diretrizes: produção, normalização e aplicações de resíduos de construção	Dissertação	EESC - USP
Levy	1997	Uso de agregados reciclados em concreto e argamassa	Dissertação	PCC - USP
Zordan	1997	Uso de agregados reciclados em concreto	Dissertação	UNICAMP
Pinto	1986	Uso de agregados reciclados em argamassa	Dissertação	EESC - USP
Angulo	(Em elaboração)	Otimização dos processos de reciclagem e controle da qualidade	Tese	PCC - USP
Carrijo	(Em elaboração)	Uso de agregados reciclados em concreto – Influência da porosidade	Dissertação	PCC - USP
Miranda	(Em elaboração)	Controle de produção de argamassas em usinas de reciclagem	Tese	PCC - USP
Shiroma	(Em elaboração)	Uso de agregados reciclados miúdos em argamassa – Contaminação e influência das condições de cura	Iniciação científica	PCC - USP
Pietra	(Em elaboração)	Uso de agregados reciclados em concreto – reforço com fibras de aço	Dissertação	PCC - USP

Como pode ser observado, ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos considerando o uso de agregados reciclados para a produção de argamassas, ainda que essa aplicação tenha sido o tema de uma das primeiras pesquisas acadêmicas nacionais, feita por Pinto (1986). A maioria dos trabalhos só considera o uso como agregado graúdo em concretos para fins não estruturais.

Entretanto, a fração miúda, ou seja, partículas com dimensões abaixo de 5 mm, é uma parcela significativa resultante da reciclagem dos resíduos de construção e demolição; mesmo quando o objetivo é a produção apenas de agregado graúdo, o agregado miúdo é naturalmente produzido como resíduo do processo de britagem. Esta fração corresponde a até 50% do montante produzido nas usinas de reciclagem no Brasil. (Angulo, 2004)

Com o crescimento do processo de reciclagem, incentivado por questões não só ambientais, mas também legais, como será visto no item 1.1.2, a tendência é que a parcela disponível de agregados de dimensões menores aumente. Portanto, é necessário ampliar os empregos para a fração miúda da britagem. Daí vem a preocupação com o estabelecimento de parâmetros para o seu emprego em concretos e argamassas.

Em contra-partida, o emprego dessa fração em materiais não estruturais, como é o caso de argamassas de revestimento e de assentamento de alvenarias, pode ser vantajoso, se ponderarmos o largo consumo dessas argamassas no Brasil e o avanço gradativo das pesquisas sobre o tema, como hoje ocorre pelos trabalhos de Miranda (2001) e Selmo (2001) e dentro dos quais se enquadra esta dissertação.

1.1.2 Legislação e normas brasileiras atuais

A legislação sobre agregados reciclados no Brasil ainda é muito escassa.

Uma das dificuldades em se estabelecer diretrizes e normalizar o uso de agregados reciclados é a sua grande variabilidade e o estabelecimento de limites para diversos contaminantes é ainda uma questão a ser resolvida.

Em termos de normalização, o que existia até agora eram, em sua grande maioria, recomendações isoladas de órgãos e prefeituras, principalmente no que se refere ao uso de resíduos de construção e demolição reciclados em pavimentação, por este ser o emprego mais difundido deste tipo de material.

No que diz respeito à gestão de resíduos, a Resolução 307/02 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, do Ministério do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), é hoje considerada um grande avanço, que pode impulsionar mudanças com relação à otimização do uso dos materiais de construção em obra, ocasionando a redução de perdas, além de estimular o reaproveitamento e a reciclagem de resíduos. E pode ser um grande incentivo para a integração entre o meio técnico e os profissionais da área, levando ao desenvolvimento de novas aplicações para os resíduos reciclados da construção civil.

A resolução citada dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil, estabelecendo diretrizes, critérios e procedimentos e disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais causados pelas obras da construção civil. Está em fase de implementação e deve mudar a maneira de se tratar a questão dos resíduos de construção em todo o Brasil.

Entre outras diretrizes, a Resolução 307/02 discorre sobre o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, que incorpora o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil² e o Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil³.

O Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil deve ser elaborado pelo(s) gerador(es), contemplando as etapas de caracterização, triagem, acondicionamento, transporte e destinação dos resíduos.

---

² Estabelece diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores.

³ Estabelece os procedimentos para o manejo e destinação ambientalmente adequados dos resíduos gerados em uma dada obra.

Como geradores são definidas as pessoas (físicas ou jurídicas) responsáveis por atividades ou empreendimentos que originem os resíduos da construção civil. Essas pessoas devem ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos, além de cuidar da redução, reutilização, reciclagem e destinação final dos mesmos.

Ou seja, tratar da questão da redução e da gestão de resíduos passou a ser, além de uma questão de consciência ambiental e de redução de custos, uma questão legislativa. Os prazos para implementação da Resolução 307/02 para os geradores e para os municípios terminam em 2005.

Neste ano de 2004, impulsionadas inclusive pela resolução citada acima, várias normas relacionadas à reciclagem de resíduos foram publicadas no Brasil.

Em maio deste ano saiu uma coletânea revisada das normas de resíduos sólidos, englobando as normas NBR 10004 até NBR 10007 (ABNT, 2004). A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, com a finalidade de orientar o seu manuseio e destinação adequados.

As normas NBR 15112 até a NBR 15116 (ABNT, 2004), publicadas em junho de 2004, tratam exclusivamente de resíduos da construção civil. As três primeiras normas se referem ao transporte e às instalações para deposição e reciclagem dos resíduos e as duas últimas se referem especificamente ao uso de agregados reciclados.

A NBR 15115 (ABNT, 2004) foi a primeira norma brasileira publicada sobre o uso de agregados reciclados e trata do seu uso em pavimentação. Ela foi seguida pela NBR 15116 (ABNT, 2004), que inclui também o uso em concreto não estrutural. Como pode-se ver, as normas não consideram o uso de agregados reciclados em argamassas.

Esta é mais uma evidência de que o desenvolvimento de pesquisas de tratem deste uso precisa ser tratado com a maior brevidade possível, pois, como já foi comentado no item 1.1.1, a tendência é o aumento da disponibilidade de frações miúdas da reciclagem.

Este é um sub-produto volumoso da britagem da fração graúda e, ainda mais, há a tendência de crescimento da implantação de novas usinas de reciclagem no país e do aumento da participação da iniciativa privada no processo, como se discute no 1.1.3, a seguir.

1.1.3 Políticas de incentivo à implantação de usinas de reciclagem no Brasil

Novas políticas governamentais vêm sendo implementadas para incentivar a gestão dos resíduos da construção civil.

Uma ação importante que comprova isso é a Resolução 396/02 do Conselho Curador do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS, 2002), do Ministério do Trabalho e Emprego, que altera a Resolução 267/97 (FGTS, 1997) e aprova o Programa de Financiamento a Concessionários Privados de Saneamento.

Este programa tem por objetivo financiar empreendimentos da iniciativa privada destinados à melhoria das condições sanitárias nas áreas urbanas. Uma das modalidades desse programa visa o financiamento de investidores privados para implantação ou ampliação da cobertura dos serviços de coleta, transporte, tratamento, reciclagem e disposição final de resíduos sólidos.

Atualmente não se verifica a efetiva participação da iniciativa privada na gestão dos resíduos de construção e demolição, a não ser pelo trabalho dos transportadores (caçambeiros). Na cidade de São Paulo há em torno de 400 pessoas e empresas cadastradas, segundo o SINDUSCON de São Paulo. (SINDUSCON, 2003)

As usinas de reciclagem hoje existentes no país são, em sua grande maioria, criadas e mantidas pelas prefeituras, como é o caso de Belo Horizonte (MG), Vinhedo (SP), São Paulo (SP), Macaé (RJ) e Ciríaco (RS), como relatado por Miranda (2003). Recentemente, em Campinas (SP), começou a funcionar uma grande usina de reciclagem, novamente administrada pela gestão pública.

Os equipamentos, processos e volume de produção são muito variáveis em cada uma das cidades. A destinação mais comum para os agregados reciclados é o emprego em sub-base de pavimentação, apesar de algumas cidades já darem outra destinação, como a produção de blocos de vedação e bloquetes, por exemplo. (Miranda, 2003)

A única usina de reciclagem privada de que se tem notícia no país é a Irmãos Preto Ltda., em Socorro (SP) que, desde o ano 2000, resolveu ir além da simples coleta e deposição dos resíduos de construção e demolição e passou a trabalhar com a reciclagem dos mesmos para uso em argamassas de assentamento.

Esta iniciativa, denominada Projeto Recicla Socorro, rendeu à empresa o prêmio SuperEcologia 2002, oferecido pela Revista Superinteressante, conforme pode ser verificado no site da empresa (Usina de Reciclagem Irmãos Preto, 2003) e vem desde essa época recebendo apoio tecnológico voluntário de pesquisadores desta Universidade, através das pesquisas de Miranda (2001), Selmo (2001) e da presente pesquisa.

A Figura 1.1 mostra obras visitadas pela autora em Socorro (SP), onde o agregado reciclado produzido na usina estava sendo empregado em argamassas de assentamento e, mais esporadicamente, em argamassas de revestimento.

Figura 1.1 – Aplicações de argamassas produzidas com agregado reciclado em Socorro (SP): (a) e (b) assentamento de alvenarias; (c) revestimento de parede, na foto com espera para fiação elétrica e (d) fachada de uma das obras.

Além do apoio ao microempresário, as pesquisas citadas também visam, como etapa final, a implementação de uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição para a produção de argamassas, que viabilize sua divulgação tecnológica diretamente para órgãos municipais e outras entidades que possam ser beneficiadas.

O grupo já elaborou um Plano de Negócio Social e este vem sendo hoje discutido com alguns empresários, como divulgado em Miranda; Selmo (2003a), além de outros trabalhos já publicados como Miranda; Aguiar; Selmo (2002), Miranda; Selmo (2003b) e Miranda; Selmo (2003c).

1.2 Justificativas do estudo

1.2.1 O gesso como contaminante nos resíduos de construção e demolição

Os contaminantes ou impurezas de agregados são os materiais minerais ou orgânicos, que prejudicam a qualidade de concretos e argamassas, pois interferem na hidratação do cimento e prejudicam o desenvolvimento de resistência mecânica.

Em processos de reciclagem tradicionais, vários contaminantes podem estar presentes nos agregados reciclados como, por exemplo: metais pesados, sulfatos, álcalis solúveis, óleo, madeira, plásticos e materiais betuminosos. No caso da contaminação por sulfatos, sua principal fonte é o gesso de construção, que é bastante usado pela construção civil.

A Resolução 307/02 (CONAMA, 2002) e a NBR 10004 (ABNT, 2004) classificam o gesso como resíduo não inerte e que, portanto, não pode ser depositado nos aterros de construção, evidenciando a preocupação do meio técnico com este tipo de resíduo. Mesmo assim, ele ainda é misturado aos outros resíduos, como mostra a Figura 1.2.

Figura 1.2 – Resíduos de gesso retirados dos resíduos de construção coletados em caçambas, na usina de reciclagem Irmãos Preto Ltda., em Socorro (SP).

O gesso é muito utilizado em edificações como pré-moldado (molduras decorativas, por exemplo) ou como revestimento, devendo neste caso ser aplicado em fina espessura, com a finalidade de regularizar a base ou prepará-la para a aplicação da pintura. Também existem as divisórias de gesso acartonado, já largamente difundidas nos grandes centros urbanos.

Em termos de consumo interno no país, dados de 2002 mostram que 56% do gipso extraído foi utilizado para calcinação, isto é, para a produção de gesso, 33% foi utilizada na produção de cimento⁴ e 12% para a correção de solo, sendo denominada neste caso de “gesso agrícola⁵”. (DNPM, 2003)

Estima-se que o consumo do gesso no Brasil esteja dividido na proporção de 61% para fundição (predominantemente placas), 35% para revestimento, 3% para moldes cerâmicos e 1% para outros usos. (DNPM, 2003)

---

⁴ A indústria cimenteira é a maior consumidora de gipsita, em termos mundiais. Na fabricação de cimento portland, a gipsita é adicionada ao clínquer, na proporção de 3 a 5% em massa, com a finalidade de retardar o tempo de pega. Quando se trata especificamente de países desenvolvidos a indústria de gesso e seus derivados absorve a maior parte da gipsita produzida. (DNPM, 2003).

⁵ O gesso agrícola é erroneamente chamado assim, pois trata-se da gipsita em estado natural (e não de gesso), utilizada na agricultura como corretivo de solos alcalinos e também nos deficientes em enxofre.

Considerando uma produção em torno de 700.000 t/ano (DNPM, 2003), resultam 245.000 t/ano de gesso aplicados em edificações. Medeiros (2004) cita valores da utilização de gesso de construção da ordem de 0,07 m²/hab no Brasil, em 2002.

Só na Região Metropolitana de São Paulo, segundo John; Cincotto (2003) estima-se um consumo de gesso para revestimento de aproximadamente 20.000 t/mês.

Agopyan *et al.* (1998) admitem que 30% do gesso de construção utilizado em obras de construção civil acaba sendo desperdiçado e virando resíduo. Isso resulta em valores próximos a 75.000 t/ano de resíduos de gesso, sem contar as obras de demolição, as indústrias de pré-moldados, as de painéis de gesso acartonado, entre outras.

Nos EUA, 10 a 12 % do gesso acartonado é transformado em resíduos durante a construção (Campbell, 2003). No Brasil a estimativa da indústria é de 5% de perdas. (John; Cincotto, 2003)

Esses valores confirmam a preocupação que se deve ter quanto à presença de gesso nos resíduos de construção e demolição e nos agregados reciclados gerados por eles.

Cabe lembrar que nas obras há um grande desperdício deste material durante a execução de revestimentos, pois o gesso em pasta endurece rapidamente, sendo em geral misturado aos demais descartes, principalmente em obras onde não há a gestão de resíduos.

Um dos fatores que contribuem para esta grande perda é o conhecimento já consagrado do rápido endurecimento da pasta de gesso, que limita o tempo de aplicação entre 20 e 40 min, no máximo, como relata Maeda (2002), por exemplo.

Com relação ao descarte e à coleta seletiva, as peças pré-moldadas e de gesso acartonado são seguramente mais fáceis de separar no processo de triagem de entulho para a produção de agregados reciclados, em função de seu tamanho e também por ficarem isoladas dos outros componentes construtivos.

No caso dos resíduos de gesso estarem na forma de revestimentos aderidos a concreto e alvenaria, a identificação deste material e a tarefa de soltar estes pedaços de gesso do substrato não é viável, pois o gesso apresenta elevada aderência a todos os tipos de base mineral, como visto em Selmo *et al.* (1997).

Assim, conclui-se que, mesmo sendo respeitada a triagem pela Resolução 307/02 (CONAMA, 2002) e pela NBR 10004 (ABNT, 2004), uma fração de resíduos de gesso sempre poderá estar presente nos resíduos de construção e demolição, principalmente de alvenarias e estruturas de tetos e paredes, que chegam às centrais de reciclagem e, conseqüentemente, poderá contaminar os agregados reciclados em baixos teores.

1.2.2 Divergências nos critérios para o limite máximo de sulfatos solúveis em agregados

A presença de gesso pode provocar um efeito danoso aos concretos e argamassas, pois os sulfatos, em presença de compostos de alumínio e cálcio como o C_3A ⁶, por exemplo, podem levar à formação de produtos expansivos e provocar fortes tensões internas e a fissuração desses materiais.

Não há um consenso no meio técnico internacional quanto aos limites de sulfato para agregados reciclados e os valores variam entre 0,15% a 1%. Também existe uma grande dificuldade em se obter dados sobre os teores reais encontrados nos agregados reciclados.

Gallias (1998), estudando agregados reciclados produzidos a partir de resíduos de construção e demolição contendo revestimento de gesso e também resíduos de concreto pré-moldado usado como base de pavimento de estradas, encontrou valores de sulfatos variando de 0,3% a 0,8% expressos em massa de SO_3 .

No Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, local desta pesquisa, mesmo os estudos com argamassas com agregados reciclados, preocupam-se prioritariamente com as propriedades mecânicas ou físicas das misturas produzidas ou com seu desempenho inicial e não atentam para requisitos relacionados à deterioração por contaminantes específicos.

---

⁶ C_3A é a terminologia abreviada do composto $3CaO.Al_2O_3$ e será aqui adotada por ser convencional na tecnologia de cimento Portland.

Ensaio realizados por Miranda (2002), com o acompanhamento desta autora, em amostras de agregados reciclados miúdos provenientes da usina de reciclagem de Socorro (SP), indicaram que quatro de vinte amostras coletadas durante quatro meses apresentavam teor de sulfato superior a 0,1%. Este valor corresponde ao limite máximo estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 1987) para agregados para concretos, determinado pelo método da NBR NM 50 (ABNT, 1996).

Torna-se então importante avaliar qual a real ação do gesso em concretos com agregado reciclado e determinar, por meio de ensaios, um ponto inicial onde o teor de sulfato torna-se excessivo, provocando a expansão crítica e fazendo com que a resistência mecânica passe a diminuir. (Gallias, 1998)

1.3 Objetivo do estudo

O objetivo desta dissertação foi analisar os efeitos do uso de agregados reciclados contaminados com baixos teores de gesso de construção em argamassas destinadas ao assentamento de alvenarias.

Através do desenvolvimento de um programa experimental foram avaliadas as alterações em diversas propriedades de argamassas pré-estabelecidas, em função da aceleração da sua deterioração por ciclos de umedecimento e secagem, em comparação com argamassas mantidas em câmara seca e inicialmente tomadas como referência.

2 DETERIORAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS POR SULFATOS DE CÁLCIO

A interpretação das reações de sulfatos em materiais à base de cimentos Portland, aqui designados apenas por materiais cimentícios, é tema há muito discutido pela indústria cimenteira e pela comunidade acadêmica internacional, e em muitos aspectos já se tem consenso, mas há outros controversos.

Neste capítulo será feita uma síntese do estado da arte sobre as principais reações e mecanismos de deterioração de produtos cimentícios por sulfatos de cálcio, com enfoque nos objetivos deste trabalho, baseado principalmente nas publicações de Taylor, Kuzel e Collepari, pesquisadores de renome que vêm tratando deste assunto na atualidade.

2.1 O gesso de construção como fonte principal de íons sulfato em agregados reciclados

Os sulfatos com origem no gesso de construção são a principal fonte de contaminação em agregados reciclados, considerando-se os níveis de consumo pela construção civil apresentados no item 1.2.1.

O gesso de construção, na sua forma original, é um material moído em forma de pó. É um aglomerante inorgânico e aéreo, de origem mineral, obtido da calcinação do gipso a temperaturas em torno de 150 °C, constituído essencialmente por sulfatos de cálcio (hemidrato e anidrita).

A matéria prima natural do gesso de construção é o minério⁷ chamado gipso, comercialmente conhecido como “gesso natural” e constituído principalmente do mineral⁸ gipsita e que pode conter anidrita de fórmula CaSO_4 e minerais acessórios⁹ como calcita, dolomita, cloreto de sódio.

---

⁷ Minério é uma associação de minerais (rocha) que pode ser explorado economicamente.

⁸ Minerais são compostos químicos naturais, geralmente no estado sólido, que compõem as rochas.

⁹ Minerais acessórios são aqueles presentes em menor quantidade nos compostos e tratados geralmente como impurezas.

O gesso de construção é o produto resultante da calcinação do gipso, também conhecido na literatura como gesso, gesso calcinado ou gesso de Paris. É constituído essencialmente por hemidratado β , contendo também anidrita II ou III, ou ainda a gipsita residual. Sua fórmula, após a reação com a água para aplicação na construção civil é $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

A Tabela 2.1, diferencia as diferentes formas cristalinas com que podem se apresentar os sulfatos nos gessos de construção de origem natural.

Tabela 2.1 – Terminologia e características das fases mineralógicas dos materiais derivados de sulfato de cálcio. (Adaptado de: Wirsching, 1985 apud Selmo, 1997)

Designações das fases mineralógicas	Fórmula química teórica	Estrutura cristalina	Nome mineralógico, formas e simbologia	Temperatura de produção industrial (°C)	Estabilidade termodinâmica (°C)	Água combinada (%)	Massa específica (kg/dm ³)	Massa molecular (g/mol)	Solubilidade (g/100 g de água a 20 °C)
Sulfato de cálcio dihidratado; dihidrato; dihidrato sintético residual ou industrial; DH α ou β	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Monoclínica	Gipsita	< 40	< 40	20,9	2,31	172,17	0,21
Sulfato de cálcio hemidratado; hemidrato; hemidrato β ; gesso β ; gesso comum; sintético residual ou industrial; HH - β	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	Romboédrica	Bassanita	120 – 180, em atmosfera seca	Metaestável em ar saturado com vapor	6,21	2,61 – 2,63	145,15	0,88
Gesso odontológico; gesso α ; sulfato de cálcio hemidratado; hemidrato α ; gesso autoclavado; HH - α	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	Romboédrica	Bassanita	80 – 180, em atmosfera úmida sob pressão	Metaestável em ar saturado com vapor	6,21	2,57	145,15	0,67
Anidrita III; anidrita solúvel; ANIII - β ; ANIII - α	0,06 – 0,11 CaSO_4	Hexagonal	ANIII - β ; ANIII' - β ; ANIII - α ; γCaSO_4	290 (v seca) 290 (v seca) 110 (v. úmida)	Metaestável em ar saturado com vapor	0,06 – 0,11	2,58	136,14	0,67 – 0,88
Anidrita II; anidrita; anidrita natural; anidrita sintética; anidrita calcinada; ANII - β ; ANII - α	CaSO_4	Rômbica	ANII – s lentamente solúvel; ANII - insolúvel; ANII – <i>Estrichgips</i> ; βCaSO_4	< 500 500 – 700 > 700	40 – 1180	0	2,93 – 2,97	136,14	0,27
Anidrita I; anidrita de alta temperatura; ANI - α ou β	CaSO_4	Cúbica	ANI; αCaSO_4	Não é comercial	1180	0	–	136,14	–

2.2 Formação de etringita nos compostos de cimento Portland

2.2.1 Etringita primária e monossulfoaluminato

A gipsita é adicionada ao clínquer do cimento para evitar a pega instantânea do C_3A (aluminato tricálcico) durante a hidratação dos cimentos Portland, em geral. Uma das teorias aceitas para explicar este fenômeno diz que os sulfatos, álcalis e íons hidroxila, ao entrarem em solução, acabam diminuindo a solubilidade do aluminato tricálcico.

A reação do C_3A com a água é imediata (pega instantânea) e a menos que a velocidade desta reação seja desacelerada, os materiais cimentícios feitos com cimento Portland não têm tempo de trabalhabilidade suficiente para serem utilizados. (Mehta, 1994)

De acordo com a teoria clássica, em compostos de cimento puros, em função da concentração do C_3A e dos íons sulfato (SO_4^{-2}) na solução, o produto cristalino formado é o trissulfoaluminato de cálcio (sigla¹⁰ AFt) ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (sigla AFm).

O trissulfoaluminato de cálcio é também conhecido como etringita. Como consagrado na literatura e evidenciado em Taylor (1996), a formação da etringita está condicionada a uma alta relação $SO_4^{-2}/Al(OH)_4^-$, junto com a presença de Ca^{+2} , OH^- e água, como descrito na Eq. 2.1:

A Eq. 2.2 mostra a reação Eq. 2.1 escrita de uma maneira diferente, em termos dos compostos:

¹⁰ Essa terminologia é usada para designar a etringita e o monossulfoaluminato impuros decorrentes da substituição parcial do alumínio por ferro e do sulfato por outros ânions (Zampieri, 1993).

A etringita cristaliza-se primeiro, pois a relação sulfato/aluminato é alta na fase aquosa durante a primeira hora. Mais tarde as características da solução se alteram, aumentando a solubilidade dos aluminatos. Esta etringita formada nas primeiras horas de hidratação é chamada de *etringita primária*.

Depois do sulfato da solução ter sido consumido, quando a concentração de aluminatos se eleva novamente devido à renovação de hidratação do C₃A e do C₄AF, a etringita torna-se instável e é gradativamente convertida em monossulfoaluminato de cálcio. A Figura 2.1 ajuda a entender a interação que ocorre em função da disponibilidade de sulfatos, aluminatos e óxidos de cálcio na matriz cimentícia.

Figura 2.1 – Diagrama de fases da formação do AFt e AFm. (Adaptado de Taylor, 1997)

A reação de conversão da etringita em monossulfoaluminato de cálcio está descrita na Eq. 2.3, de Taylor (1996):

Reescrevendo a Eq. 2.3 em termos de compostos, tem-se a Eq. 2.4.

De acordo com a teoria clássica, como citado, por exemplo, por Mehta (1994), o monossulfoaluminato é o produto final da hidratação dos cimentos Portland com mais de 5% de C_3A .

Ainda pela teoria clássica, a Figura 2.2 mostra a redução da concentração de etringita e o aumento da formação do monossulfoaluminato ao longo do tempo de hidratação, onde percebe-se a formação do monossulfoaluminato e a redução da etringita a partir de 24 horas, aproximadamente, do início da hidratação do cimento Portland.

Cabe salientar que “a hidratação da fase ferrita (C_4AF) ocorre paralelamente à do C_3A , com formação de fases análogas à etringita (AFt) e à fase monossulfoaluminato (AFm). As reações são mais lentas do que as do C_3A e desenvolvem menos calor. O C_4AF nunca reage rapidamente e a gipsita retarda ainda mais sua hidratação”. (Camarini, 1995)

Figura 2.2 – Produtos da hidratação do cimento x tempo. (Locher; Richartz; Sprung, 1976 apud Djanikian, 1987)

A teoria clássica é registrada e evoluiu através de publicações desde o começo do século 20 e até hoje é reconhecido por autores que pesquisam o assunto, como é o caso de Taylor (1996), Kuzel (1996) e Collepardi (2003).

Taylor (1996) evidencia que para a ocorrência da conversão de etringita em monossulfoaluminato, a relação entre SO_3 e Al_2O_3 precisa ser de 0,79, em massa. Kuzel (1996) salienta ainda que a concentração de SO_3 dentro da solução dos poros

precisa cair abaixo de 2,35 mg/L para que a etringita esteja estável e não se converta em monossulfoaluminato.

2.2.2 Etringita tardia

Quando a etringita é formada na pasta endurecida é chamada de *etringita tardia*. A sua expansão é heterogênea e em um concreto já endurecido e muito rígido pode causar fissuras e lascamentos, ou seja, a sua deterioração progressiva. Collepardi (2003) considera que isto ocorre meses ou anos depois da produção do material.

A formação da etringita em idades mais avançadas dos materiais cimentícios está relacionada com a conversão do monossulfoaluminato novamente em etringita, em função da presença de íons SO_4^{-2} no sistema.

Segundo Collepardi (2003), citando outros autores como Taylor e Lawrence, os termos etringita tardia ou etringita secundária são em geral usados para descrever apenas a etringita formada a partir de sulfatos internos ou intrínsecos à pasta.

Entretanto, ele considera que o termo etringita tardia deve ser usado para descrever qualquer etringita formada posteriormente ao endurecimento da pasta e que o emprega também para descrever a etringita formada pelo ataque de sulfatos externos.

Como pode ser visto na literatura técnica, os termos usados para descrever a etringita formada após o endurecimento dos produtos cimentícios divergem de autor para autor.

Em vista desta terminologia ser confusa, Odler (1997), por exemplo, listou vários tipos de etringita e suas características peculiares, como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Termos associados às formas de etringita em pastas de cimentos Portland. (Adaptado de Odler, 1997)

Designação da etringita		Prazo de formação	Condição de formação	Origem do Al_2O_3	Cristal / Expansão
Inglês	Português				
Early primary	Primária	Primeiras horas após a hidratação	Condições normais de hidratação	C_3A	Microcristalino / Não
Late primary	Primária atrasada	Primeiros dias ou semanas após a hidratação	Quantidade excessiva de gesso no cimento	C_3A	Microcristalino / Sim
External	Externa	Em qualquer tempo	Migração de SO_3 do ambiente externo	monossulfato	Microcristalino / Sim
Delayed	Retardada ou tardia	Meses após a cura a vapor	Após cura a vapor com temperaturas maiores que 70°C	monossulfato	Microcristalino / Sim
Secondary	Secundária	Meses após a cura a vapor	Recristalização da etringita em fissuras formadas após molhagem e secagem	etringita	Macrocrystalino / Não (?)

Além dos prazos e origens de formação resumidos por Odler (1997), que constam na Tabela 2.2, verifica-se por outros artigos, como o de Taylor; Famy; Scrivener (2001), que há discussões sobre a formação da etringita secundária, embora equivocadas na opinião desses autores.

Collepari (2003) propõe que o termo formação de etringita tardia (em inglês – DEF – Delayed Ettringite Formation) seja usado para descrever qualquer tipo de etringita formada após o final de pega, quando o concreto ou a argamassa já se encontram endurecidos.

Nesta pesquisa optou-se por utilizar como nomenclatura o termo etringita tardia, para designar a etringita formada depois que a argamassa já se encontra endurecida.

2.3 Alterações possíveis na microestrutura de materiais cimentícios por etringita tardia

Reações envolvendo a formação de etringita em idades mais avançadas, após o fim da pega, podem estar relacionadas com processos destrutivos que se iniciam a partir da formação de *etringita tardia* dentro dos poros de concretos, argamassas ou pastas no estado endurecido.

A formação da *etringita tardia* não ocorre de forma homogênea em toda a matriz cimentícia, ocasionando um aumento de volume, gerando tensões que podem provocar fissuras nos concretos e argamassas endurecidos. (Collepari, 2003), (Taylor; Famy; Scrivener; 2001), (Hime; Mather, 1999) e (Fu *et al.*, 1999)

A relação $\text{SO}_4^{-2}/\text{Al}_2\text{O}_3$ é um dos fatores principais na formação de *etringita tardia* e suas conseqüências, pois este afeta a estabilidade da etringita primária. Em relações ricas em SO_4^{-2} , a etringita encontra-se estável.

Já em relações baixas, há a presença de monossulfoaluminato, ou seja, a matriz está mais susceptível à reversão do monossulfoaluminato novamente em etringita, em função do aumento da relação $\text{SO}_4^{-2}/\text{Al}_2\text{O}_3$ como conseqüência da presença de íons sulfato provenientes de fontes externas ou internas.

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 32 moléculas de água do composto, conforme a Eq. 2.3, no item 2.2.1.

A estrutura cristalina da etringita e do monossulfoaluminato não é a mesma. A da etringita é a de cristais aciculares e a monossulfoaluminato é de placas hexagonais, como pode ser visto na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita formados pela mistura de soluções de aluminato de cálcio e de sulfato de cálcio. (Mehta, 1994)

A Figura 2.4 mostra uma representação esquemática do que acontece nos poros com a transformação do monossulfoaluminato em etringita, em função de suas estruturas cristalinas, podendo afetar as propriedades dos materiais cimentícios.

Figura 2.4 – Representação esquemática da pressão causada nos poros devido à transformação do monossulfoaluminato em etringita. (Adaptado de Taylor; Famy; Scrivener, 2001)

A possibilidade da reação expansiva tem a ver com a relação $\text{SO}_4^{-2}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Há situações onde há a presença de sulfato, mas este se encontra combinado ou apresenta baixa solubilidade. Nestes casos a formação de etringita é afetada. Em alguns casos pode haver a liberação do sulfato ao longo do tempo levando à formação de etringita tardia. Outro caso é a disponibilização de sulfato na matriz, proveniente do meio externo, provocando o desequilíbrio da relação $\text{SO}_4^{-2}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ($\text{AFt} \leftrightarrow \text{AFm}$) e a formação de etringita.

A escola clássica defende a reversão do monossulfoaluminato em etringita em função do ingresso de íons sulfato no sistema. No entanto, estudos mais recentes, como os de Taylor (1996 e 1997), Kuzel (1991 e 1996) e Kakali; Tsivilis; Aggeli (2000), consideram que esta reversão possa ocorrer em função da presença de outros íons ou compostos no sistema como, por exemplo, o CO_2 e a portlandita, como descrito na Eq. 2.5, transcrita de Taylor (1996)

Reescrevendo Eq. 2.5 em função dos compostos, temos a Eq. 2.6¹¹, transcrita de Kuzel (1996).

Como se pode ver neste caso, a reação leva à formação de etringita e à ocorrência de carbonatação. Kuzel (1996) explica que o concreto contendo monossulfoaluminato é atacado pelo CO_2 . O SO_4^{-2} na estrutura cristalina do monossulfoaluminato é substituído pelo CO_3^{-2} (Figura 2.5); como resultado, a concentração de sulfato na solução dos poros aumenta, e a etringita é formada novamente.

---

¹¹ As equações de Kuzel (1996) diferem ligeiramente nos valores de moléculas de água da etringita e monossulfoaluminato apresentados na Eq. 2.2 e Eq. 2.4.

Figura 2.5 – Troca de íons SO_4^{2-} por CO_3^{2-} na estrutura cristalina do monossulfoaluminato. (Kuzel, 1996)

Kuzel (1996) discute a ocorrência de monossulfoaluminato nos materiais cimentícios em função do teor de CO_2 na matriz cimentícia, como pode ser visto na Figura 2.6. Todavia, o autor reconhece que não é claro ainda se a etringita tardia formada pela carbonatação, de acordo com a Eq. 2.6, é meramente de interesse teórico ou se pode também afetar a durabilidade de materiais cimentícios na prática, porque as informações são muito limitadas quanto aos hidratos presentes em concretos e argamassas coletados em campo.

De forma preventiva à formação de etringita por carbonatação, esse pesquisador ainda recomenda que o cimento Portland sempre contenha algum teor de carbonato de cálcio reativo, de modo a ocorrer o que apresenta o lado direito da Figura 2.6.

Figura 2.6 – Influência do CO_2 nas reações de hidratação do C_3A em cimentos Portland. (Adaptado de Kuzel, 1996)

Taylor (1997), também fala da conversão de monossulfoaluminato em etringita pela disponibilização de íons SO_4^{-2} a partir de anidrita, e nestes casos pouca ou nenhuma dissolução da portlandita e ou descalcificação do C-S-H precisam ocorrer.

De qualquer forma, o que se pode concluir da literatura, é que a existência do monossulfoaluminato, condicionado ou não à disponibilidade de íons SO_4 , é um fator de risco para a formação de produtos expansivos, visto que esse não é o único íon passível de propiciar a reversão do monossulfato em etringita e hoje muito se discute a importância da presença de CO_2 .

2.4 Deterioração por contaminação por sulfatos de origem interna

Em função da origem da fonte de sulfatos nos materiais cimentícios, Collepardi (2003) classifica os processos de deterioração em dois tipos:

- *Deterioração por sulfatos de origem externa* – os sulfatos têm origem no ambiente de exposição, como solo contaminado por sulfato ou exposição a águas agressivas contendo sulfato¹².
- *Deterioração por sulfatos de origem interna* – os sulfatos têm origem intrínseca ao concreto ou argamassa, isto é por contaminação ou adição excessiva de sulfatos aos materiais constituintes, também por sulfatos provenientes da clínquerização com combustíveis alternativos ricos em enxofre.

No escopo deste trabalho, onde foram empregados agregados reciclados contaminados por sulfatos, em função da presença de revestimentos de gesso, a origem dos sulfatos é interna, e os itens seguintes discutem um pouco melhor esta situação.

---

¹² Como o objetivo deste trabalho é a avaliação da deterioração por sulfatos intrínsecos ao agregado e, portanto, vindos de fonte interna, este capítulo não irá se deter na explicação dos mecanismos de deterioração por sulfatos de origem externa.

2.4.1 Situações e mecanismos possíveis de ocorrência

A deterioração de concretos e argamassas por sulfatos internos é um assunto relativamente novo, se comparado com o ataque por sulfatos externos.

As quatro possibilidades clássicas de ataque interno podem ser vistas na Tabela 2.2 e ainda não contemplam as questões discutidas por Kuzel (1996), salientada no item 2.3.

No Brasil tem-se registro de um problema de grande vulto envolvendo o Conjunto Habitacional Castelo Branco, construído pela COHAB-SP, em Carapicuíba (SP) onde as vedações verticais, que foram painéis pré-moldados feitos com 60% de gesso e 40% de cimento Portland levaram à formação de etringita tardia, agravada pela falta de cuidados na execução e pela falta de manutenção. Houve uma deterioração tão séria dos painéis e da estrutura que culminou com a implosão de dez edifícios do conjunto habitacional (John; Cincotto, 1991; Rocha, 1991).

Por outro lado, Collepardi (2003) relata que este tipo de deterioração também começou a ser observado e relatado na década de 80, em auto-estradas com pavimentos de concreto protendido.

Segundo Collepardi (2003), os dois seguintes mecanismos de deterioração podem ser atribuídos ao ataque por sulfatos internos:

- Decomposição térmica e recristalização da etringita, em atmosfera saturada e temperatura ambiente, em decorrência de cura térmica de pré-moldados;
- Mecanismo complexo e holístico que pressupõe a existência de microfissuras, liberação atrasada de sulfatos e a exposição à água.

Alguns autores defendem que a deterioração por sulfatos internos é apenas causada pela decomposição térmica da etringita quando os concretos e argamassas são submetidos à cura térmica, em temperaturas superiores a 80 °C (Taylor; Famy; Scrivener, 2001; Fu *et al.*, 1997). Como a maior parte da literatura sobre este assunto é internacional e a cura térmica é bastante comum em países desenvolvidos, pode ser

que este tipo de mecanismo de deterioração por sulfatos seja o mais comum naqueles países¹³.

Collepardi (2003) afirma que a decomposição térmica da etringita primária é a causa mais freqüente desse tipo de ataque. Taylor; Famy; Scrivener (2001) consideram que a decomposição térmica da etringita é a principal causa da deterioração por sulfatos internos, e que a outra causa possível seriam cimentos com altos teores de SO_3 . Mencionam ainda como equívocas e não bem fundamentadas as hipóteses que consideram outras causas que não estas duas.

Entretanto, as outras formas de fonte interna de sulfatos (como agregados contaminados, por exemplo) e a deterioração que elas causam não podem ser desprezadas e serão a seguir abordadas para o foco desta pesquisa.

A ação de sulfatos internos ocorre quando há sulfato livre na microestrutura da pasta, em função da liberação atrasada de sulfato proveniente de agregados contaminados por gesso ou da decomposição térmica da etringita primária.

Esta ação é favorecida pela existência de microfissuras, onde pode ocorrer a deposição de cristais de etringita e ocorre em um ambiente que favoreça a difusão de SO_4^{-2} e a reação com íons Ca^{+2} e aluminato, através dos poros capilares saturados de água. (Collepardi, 2003).

2.4.2 Mecanismo holístico de deterioração

É baseado na liberação atrasada do sulfato e deposição de etringita nas microfissuras pré-existentes. A exposição a um ambiente com água ou ar saturado causa inchamento ou crescimento do cristal de etringita, levando a danos subseqüentes em elementos do concreto.

A Figura 2.7 mostra a interação dos três fatores principais que desencadeiam a formação de etringita, segundo uma visão holística do fenômeno. A área central corresponde ao risco do ataque interno por sulfatos, pois representa a presença dos três fatores ao mesmo tempo.

---

¹³ A decomposição térmica não será abordada neste trabalho, porque o agregado reciclado não devem ser utilizado em obras de grande vulto, onde este tipo de cura possa ser aplicado.

Figura 2.7 - Elementos necessários para a ocorrência de ataque por sulfatos internos – AIS. (Adaptado de Collepari, 2003)

De acordo com este mecanismo, quando há liberação atrasada de sulfato, presença de microfissuras e exposição à água ao mesmo tempo há uma grande possibilidade da ocorrência da deterioração por sulfatos. Estes fatores são melhor descritos a seguir:

a) A liberação atrasada de sulfato

O mecanismo de deterioração por sulfatos provenientes de fonte interna ocorre em ambientes com sulfato livre devido à sua liberação atrasada proveniente do cimento (decomposição térmica da etringita) ou de agregados contaminados por gesso.

Collepari (2003) comenta que este último caso é raro, em função do controle feito com agregados, na indústria de pré-moldados. No entanto, em se tratando de agregados reciclados, como já comentado por Gallias (1998), este é um fator que deve ser levado em consideração, em função da falta de coleta seletiva e da falta de controle da origem dos resíduos que chegam às centrais de reciclagem. Como citado no capítulo 1, esta autora prevê como ainda mais difícil a separação de revestimento de gesso de substratos de alvenarias ou concretos de obras novas ou demolição.

Collepari (2003) reforça ainda a possibilidade da contaminação por sulfato em agregados reciclados ser prejudicial através do seguinte comentário: pelo tamanho relativamente grande das partículas de sulfato de cálcio, a solubilização não é imediata para formar etringita primária e isto pode alimentar a formação de etringita tardia.

Apesar de Collepari relatar que todo o sulfato presente no agregado contaminado está combinado nos produtos de hidratação do cimento e não produz expansão significativa nos concretos e argamassas, um dos objetivos do programa experimental dessa dissertação é justamente avaliar esta afirmação.

b) A presença de microfissuras

É através das microfissuras que a água penetra e pode chegar até os sulfatos para solubilizá-los e provocar o início das reações. É nas microfissuras que ocorrerá a deposição da etringita tardia formada.

c) A presença de água

A presença de água preenchendo o sistema de poros do concreto é essencial para a difusão dos íons SO_4^{-2} , $\text{Al}(\text{OH}_4)^-$ e Ca^{+2} para as microfissuras onde a deposição da etringita possa ocorrer.

Cabe salientar ainda que, muitas vezes, a perda de resistência mecânica e de aderência em função da formação de etringita causa uma deterioração bem mais grave do que a expansão e fissuração e que, muitas vezes, isso não é levado em conta nos estudos de laboratório. (Taylor, 1997)

2.5 Limites normalizados para sulfatos solúveis em agregados

Gallias (1998) afirma que uma das principais patologias relatadas no uso de agregados reciclados em concreto é a expansão severa e a fissuração, causadas pela formação de etringita. Chega a dizer que o risco do ataque por sulfato e a formação de etringita é a razão principal para a limitação do uso de agregados reciclados em concreto.

Claro que há um pouco de exagero nesta afirmação e há vários outros fatores que limitam e às vezes até impedem o uso do agregado reciclado, como a diminuição da resistência mecânica, a variabilidade da composição e a alta absorção de água, por exemplo.

Em contrapartida, não se pode desprezar os efeitos que a contaminação pelo sulfato pode causar à estrutura interna de concretos e argamassas, e o estabelecimento de

critérios seguros para limites de aceitação desse contaminante é um avanço importante para a tecnologia da reciclagem.

Não há um consenso no meio técnico internacional quanto aos critérios e limites de sulfato para agregado reciclado, como pode ser visto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Limites de sulfatos para agregados em mistura com cimento Portland.

País	Referência	Norma	Limite de sulfatos solúveis		Aplicação
			Valor	Forma de expressão	
França	AFNOR (1994)	NF P 18 541	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	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

* Sulfatos totais (solúveis e combinados).

A maioria do limites informados 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.

Como se pode ver, apenas a norma DIN 4226-100 se refere aos limites para argamassas produzidas com agregado reciclado, enquanto a especificação ES-5 do IPT se refere a agregados naturais.

É necessário aprofundar este tema nas pesquisas sobre agregados reciclados, considerando que estes são mais porosos que os agregados naturais e talvez possam, em tese, suportar melhor as tensões de expansão pela formação da etringita. (Collepari, 2003)

O consumo de cimento usado na aplicação do agregado reciclado poderá condicionar maior ou menor disponibilidade de C_3A para reações expansivas, seja em concretos ou argamassas não estruturais. Da mesma maneira, a origem do agregado reciclado (concreto estrutura ou alvenarias, por exemplo) pode influenciar este teor.

Como no início desta pesquisa não havia ainda no Brasil uma norma que tratasse especificamente de agregados reciclados, adotou-se a NBR 7211 (ABNT, 1987) como referência. Ela estabelece que o teor de sulfatos, expressos em SO_3 nos agregados naturais deve ser menor que 0,1%, em massa de agregado.

Quando esse teor é maior do que 0,1%, o uso do agregado é permitido, desde que o teor total de sulfatos de todos os componentes do concreto (incluindo água, agregados, cimento, adições e aditivos químicos) não exceda 0,2%, ou que se use cimento Portland resistente a sulfatos, conforme a NBR 5737 (ABNT, 1992).

Salienta-se que mesmo para estabilização de solos com cimento, Sherwood (1993) recomenda valores máximos de 1900 mg/L, expressos em SO_3 , o que corresponde a 2290 mg/L, expressos em SO_4 .

2.6 Danos por sais de sulfato em alvenarias sujeitas à ação simultânea de umidade

As anomalias e os danos causados por umidade e sais em edificações é um tema atual e há muitos anos vêm preocupando a comunidade internacional da construção civil.

A deterioração mais comum e correlacionada com a solubilização de sais em materiais cimentícios é a formação de eflorescência. No Brasil, as primeiras

contribuições sobre as manifestações de sais em alvenarias, chamadas de eflorescência, foram discutidas por Cincotto (1983) e Uemoto (1988).

Trabalhos nacionais com foco em metodologias para avaliar os mecanismos de deterioração são raros. Entretanto, duas recentes publicações de Quarcioni, Chotoli; Aleixo (2003a, 2003b) evidenciam que os sais solúveis em materiais como argamassas mistas, têm sido objeto de investigação recente pelo IPT.

A tendência é de que esses tipos de danos sejam cada vez mais pesquisados e discutidos, pois a construção de obras novas ou as obras de recuperação, restauro ou manutenção devem visar a durabilidade como requisito essencial para o desenvolvimento sustentável do ambiente construído.

A durabilidade de alvenarias e seus materiais, segundo a RILEM (1998), pode ser conceituada como sendo a capacidade da mesma manter as suas propriedades em função do tempo, ou seja, de não se deteriorar.

Chama-se aqui a atenção que a tecnologia de produção de argamassas com agregados reciclados para assentamento ou revestimento de alvenarias apenas poderá evoluir, no Brasil, se acompanhada de estudos que enfrentem os problemas mais críticos de durabilidade, como é o caso da contaminação por sulfatos, entre outros sais.

Na Europa, os problemas com umidade e sais em alvenarias são estudados há muito tempo e já levaram às proposições dos seguintes métodos pela RILEM, através do TC 127 - MS (RILEM, 1998), envolvendo aparelhagens e ensaios cíclicos com condições do clima europeu:

- MS – A.1 – Determination of the resistance of wallties against sulphates and chlorides;
- MS – A.2 – Uni-directional salt crystallization test for masonry units;
- MS – A.1 – Determination of the durability of hardened mortar;
- MS – B.1 – Freeze / thaw test of masonry panels.

Muitos institutos europeus acumulam experiências bem sucedidas na recuperação de anomalias e danos causados por umidade e sais nos edifícios e têm por prática a análise criteriosa dos mecanismos de deterioração envolvidos. Esse, por exemplo, é o caso do IGS¹⁴ – Institute for Building Analysis and Reconstruction Planning of Munique.

Segundo o Prof. Dr. Jörg Seele¹⁵, os danos por sulfatos solúveis presentes em alvenarias afetadas por umidade podem ser avaliados pelos limites na Tabela 2.4 e são por ele indicados como critérios para uma boa previsão.

Tabela 2.4 – Níveis de contaminação e danos esperados para a ação de sulfatos, em materiais de construção, por critérios do IGS. (Seele; Greven; Selmo, 2004)

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

A Tabela 2.4 mostra sinais de deterioração em função de sais solúveis em alvenaria. As manchas brancas caracterizam a formação de eflorescência, e os danos podem chegar a fissuras horizontais, em função da cristalização de sais. A eflorescência de sulfatos pode ser esbranquiçada, segundo Uemoto (1988).

Os mecanismos dos danos indicados na Tabela 2.4 podem decorrer da presença de um ou mais sais de sulfato, por pressão de cristalização, e estarem ou não associados à contaminação por gesso ou à formação de etringita tardia.

Os danos por pressão de cristalização estão correlacionados com a dissolução de sais solúveis e recristalização ou formação de sais mais complexos, em poros de materiais cerâmicos ou outros materiais cimentícios, pela alternância de umidade.

¹⁴ Na Alemanha, o nome oficial do IGS é “Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung München – GmbH”.

¹⁵ O Dr.-Ing. habil. Jörg Seele é diretor do IGS e esteve em visita ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, em maio de 2004, a convite da orientadora deste trabalho.

A contaminação de alvenarias por sais solúveis pode decorrer do molhamento e secagem de paredes por água de chuva ou contato com solos contaminados, por exemplo. Também é discutida pela literatura a ocorrência de sulfatos em componentes de cerâmica vermelha e a degradação de juntas de alvenaria, por formação de etringita (Uemoto, 1988).

A pressão de cristalização de sais pode causar uma expansão similar ao que acontece com a reversão do monossulfoaluminato em etringita, esquematizada na Figura 2.4, onde os poros vazios passam a ser ocupados pelos sais cristalizados, e o crescimento destes cristais de sais pressiona as paredes dos poros, causando tensões internas que podem causar prejuízos aos materiais cimentícios, como fissuração e perda de resistência mecânica, por exemplo.

Figura 2.8 - Efflorescências esbranquiçadas: as anomalias mais comuns causadas por sais solúveis em materiais de construção. (Foto de J. Seele)

2.7 Pesquisas recentes sobre a ação de sulfatos e outros sais solúveis em concretos e argamassas

Na pesquisa bibliográfica para esta dissertação, verificou-se que trabalhos importantes sobre o tema estão sendo realizados e alguns dos principais já foram discutidos neste capítulo de revisão bibliográfica básica, que não visou esgotar o tema, mas também somente organizar o conhecimento básico a respeito do assunto.

Embora este seja um assunto bastante abordado e discutido no meio técnico internacional, cada pesquisador aplica uma metodologia experimental distinta, com condições de cura e demais parâmetros de ensaio bem diferentes uns dos outros.

A Tabela 2.5 mostra um resumo de alguns trabalhos experimentais desenvolvidos com relação a este tema e que se considera oportuno destacar em função do foco do programa experimental apresentado no Capítulo 3. Observa-se que as diferentes metodologias usadas pelos pesquisadores impedem melhores conclusões sobre o assunto.

Tabela 2.5 – Pesquisas recentes sobre os efeitos da presença de íons sulfato em concretos e argamassas.

Autor	Materiais utilizados	Sais analisados	Corpo-de-prova	Cura	Idade do ensaio	Ensaio	Ciclo
Batic <i>et al.</i> (2000)	Concreto com dois tipos de cimento com diferentes teores de SO ₃ , diversos tipos de cura e condições de exposição	Expansão por sulfatos presentes no cimento – Mecanismo de deterioração por sulfatos de fonte interna – Concreto	4 x 4 x 16 cm	Lâmina d'água a 23° C, ininterrupto ou 14 dias, imerso em água e selado em sacos plásticos	12 e 24 meses	Variação dimensional e resistência mecânica e ensaios microscópicos	Ciclos de molhagem e secagem, ciclos de gelo/degelo. Os corpos-de-prova não ciclados foram submetidos a pré-tratamentos (fissuração ou reação álcali-silica)
Fu <i>et al.</i> (1997)	Diversos cimentos, agregados naturais, ciclagem, cura, forma, etc.	Expansão por sulfatos – Mecanismo de deterioração por sulfatos de fonte interna – Argamassa	2,5 x 2,5 x 16 cm	90 ° C por 12 horas	0 a 250 dias	Variação dimensional	Molhagem e secagem – não descreve o método
Gallias (1998)	Argamassas moldadas com agregados reciclados e cimentos com diferentes teores de C ₃ A	Expansão por sulfatos – Mecanismo de deterioração por sulfatos de fonte interna - Argamassa e concreto	4 x 4 x 16 cm	Submersa	90 dias	Variação dimensional	Não teve
Nappi; Peluso; Toner (1999)	Argamassas industriais, estrangeiras e nacionais, argamassa comum e argamassa experimental	Formação de sais totais	Cilíndrico 5 x 10 cm	Não descreveu	45 dias ao iniciar os ciclos	Determinação de sais totais através da diferença de peso dos corpos-de-prova após secagem e deterioração por inspeção visual	Ciclos de 48 horas (24 h numa lâmina d'água de 1 cm e 24 seco em estufa a 105° C) 10 ciclos
Rendell; Jauberthie (1999)	Argamassa com cimento comum, submetida a várias condições de cura e depois imersa em água sulfatada	Expansão por sulfatos presentes no cimento – Ataque externo – Argamassa	4 x 4 x 16 cm	1 dia ou 28 dias em umidade saturada e depois 3 meses em câmara seca (20 °C e UR 55%)	3 meses	Micro-análise, difração de Raios-X, teste de Vickers, microscopia eletrônica.	Não teve – 6 meses de imersão ininterrupta em água sulfatada
Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003a)	Argamassas com cimento Portland comum e adição salina à mistura	Determinação de sais solúveis em argamassas endurecidas	4 x 4 x 16 cm	28 dias – ambiente de laboratório	28 dias	Proposta para método de determinação de sais solúveis em argamassas endurecidas	Não teve
Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003b)	Argamassas com cimento Portland comum e adição salina à mistura	Avaliação da formação de eflorescência em argamassas endurecidas	4 x 4 x 16 cm	28 dias – ambiente de laboratório	28 dias	Comparação entre métodos acelerados para avaliação da formação de eflorescência em argamassas endurecidas	Não teve

Batic *et al.* (2000), estudaram concretos produzidos com dois tipos de cimento com diferentes teores de SO_3 , diversos tipos de cura e condições de exposição como: ciclos de molhagem e secagem, ciclos de gelo/degelo, corpos-de-prova não ciclados foram submetidos à pré-tratamentos (fissuração ou reação álcali-sílica). Após dois anos, concluiu que os ciclos de umedecimento e secagem causam expansão e fissuração nos concretos por fenômenos físicos da ação da água dentro dos poros e fissuras. Após 18 meses a etringita começou a aparecer nos poros, porém não em quantidade e cristalização que pudessem causar a deterioração dos concretos.

Fu *et al.* (1997) estudaram argamassas com diversos cimentos, agregados naturais e comprovaram a influência da ciclagem, do tipo e da temperatura de cura, do tipo de fôrma utilizada, da granulometria do agregado, entre vários outros fatores, que interferem nos fenômenos e nos ensaios relacionados à formação de etringita nos materiais cimentícios.

Gallias (1998) concluiu que 0,3 a 0,8% de sulfatos expressos em SO_3 nos agregados reciclados que estudou, não foram suficientes para produzir expansão consideráveis nos concretos e argamassas, o que só acontecia quando estes valores atingiam 1,2% em massa de agregado.

Nappi *et al.* (1999) estudaram argamassas industriais, estrangeiras e nacionais, argamassa comum e argamassa experimental submetidas a ciclos de 48 horas (24 h numa lâmina d'água de 1 cm e 24 seco em estufa a 105°C) por 10 ciclos e fez a determinação de sais totais através da diferença de peso dos corpos-de-prova após secagem e deterioração por inspeção visual, desenvolvendo um método simples que deve ser melhor aproveitado.

Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003a) visando estudar um método para quantificar sais solúveis em argamassas, estudaram misturas de proporção 1:1:8 em volume, com cimento Portland CP I-32, cal hidratada CH-I e areia, adicionadas ou não de uma solução salina mista, em três porcentagens. Concluíram que a solubilização de sais pelo método estudado pôde ser comparada à “lixiviação de concreto por ação de águas puras”, pois promoveu a “remoção de hidróxidos alcalinos, dissolução e arraste de portlandita e decomposição das fases de silicatos e aluminatos hidratados (Taylor, 1997)”. Eles também quantificaram uma grande concentração de cálcio, como portlandita ou calcita, provenientes da cal hidratada ou cimento usado nas argamassas,

já que este elemento não tinha sido adicionado à solução salina e sua ocorrência foi detectada mesmo nas argamassas de referência do estudo.

Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003b) estudaram ainda algumas dessas argamassas para avaliar métodos de determinação de eflorescências. A conclusão foi que a secagem por evaporação superficial foi muito importante para favorecer o fenômeno e que a simples exposição ao ambiente natural ou à secagem em câmara seca não desencadeiam o mesmo processo que ocorre pela secagem superficial favorecida em temperaturas mais elevadas (acima de 65 °C).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Pelos motivos expostos nos Capítulos 1 e 2, decidiu-se realizar um estudo experimental com a finalidade de analisar o efeito do uso de agregados reciclados contaminados com gesso de construção em argamassas de assentamento de alvenarias, que é o emprego atual do agregado reciclado produzido na Usina de Reciclagem Irmãos Preto, em Socorro (SP).

Este estudo foi feito considerando-se que a presença de revestimentos de gesso nos resíduos de construção e demolição é uma questão real e que não pode ser ignorada (item 1.2.1), que este tipo de contaminação em agregados reciclados precisa ser melhor avaliado (item 1.2.2).

Detectou-se a necessidade desta pesquisa durante estudos preliminares de Miranda (2002), que encontrou teores de sulfato superiores a 0,1% em massa de agregado em 4 de 20 amostras de agregados reciclados, coletadas aleatoriamente num período de 4 meses, na usina de reciclagem de Socorro, não atendendo assim os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 1987). Esta norma se refere a agregados naturais, mas foi adotada em função de não existir na época nenhuma norma brasileira específica para agregados reciclados.

Os fatores listados abaixo influenciam no fenômeno de formação da etringita tardia e foram considerados no planejamento deste estudo, com base no mecanismo proposto por Collepardi (2003) e discutido no item 2.4.2:

- Expor as argamassas inicialmente logo após a moldagem a um ambiente úmido, para favorecer a solubilização dos íons presentes no agregado reciclado, no cimento e na cal para favorecer as reações químicas de formação do composto expansivo em estudo;
- Aplicar ciclos de umedecimento e secagem para favorecer a formação de microfissuras e a deposição dos cristais de etringita tardia;

- Na ciclagem, secar as argamassas utilizando temperatura bem inferior a 70 °C, de modo a impedir a decomposição da etringita primária (Collepari, 2003), o que poderia mascarar os resultados de análise de formação da etringita tardia, em função da liberação atrasada de sulfato pelo agregado reciclado.

Assim, realizou-se um programa experimental com o seguinte objetivo:

3.1 Objetivos do programa experimental

Este programa experimental teve como objetivo analisar os efeitos da utilização de agregados reciclados contaminados por revestimentos de gesso, nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas passíveis de aplicação no assentamento de alvenarias, adotando-se um ciclo de umedecimento e secagem para a aceleração do processo de deterioração causado pelo contaminante em questão.

O tipo de contaminação visado neste estudo é, portanto, relativo a baixos teores, o que em certos aspectos pode ser mais crítico se considerados os efeitos da relação $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ discutidos no Capítulo 2. Além disto, a situação de baixos teores de contaminação é a que se pode esperar em uma usina onde haja uma preocupação mínima com a triagem destes contaminantes em pedaços ou fragmentos maiores, fazendo com que os resíduos de gesso puro ou de placas de gesso acartonado sejam facilmente descartados; já os revestimentos de gesso, estes sim poderão facilmente passar despercebidos sob os fragmentos de paredes com pintura.

A influência do tipo de cimento foi ainda estudada para uma das proporções em massa utilizadas na produção das argamassas, enquanto nas demais foi usado um cimento potencialmente inibidor da reação expansiva de formação da etringita tardia e que foi o CP III 32 RS, focando-se principalmente analisar a influência de ciclos de umedecimento e secagem na aceleração do processo de degradação das argamassas.

Para atingir o objetivo, um dado ciclo de umedecimento e secagem pré-estabelecido foi aplicado entre 63 e 175 dias de idade das argamassas e as seguintes propriedades foram avaliadas:

- Resistência mecânica, por meio de ensaios de tração na flexão, compressão simples, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico;

- Alterações na microestrutura¹⁶, por meio de ensaios de termogravimetria, composição química e determinação de sulfatos solúveis e sais solúveis;
- Susceptibilidade à formação de eflorescência, variação dimensional, densidade, absorção de água e porosidade inicial.

3.2 Resumo da metodologia

A primeira fase foi a produção artificial dos agregados reciclados, a partir de pórticos de concreto, alvenaria e argamassa, construídos em laboratório com materiais de construção da região de Socorro (SP).

Os agregados reciclados foram contaminados com diferentes teores de sulfato (por meio da aplicação de revestimento de gesso nos pórticos) e foram depois empregados na produção de argamassas de assentamento.

Para a produção dos agregados foram construídos 4 pórticos de alvenaria de tijolo maciço envolvida por elementos de concreto e revestidas com emboço de argamassa. Em 3 destes pórticos foi aplicado revestimento de gesso e cada um deles recebeu uma camada de revestimento de espessura diferente para que, depois de demolidos e britados, gerassem agregados com teores diferentes e crescentes de sulfato solúvel.

Buscou-se variar nos agregados reciclados teores em torno do limite para agregados naturais (0,1% de SO_4 em massa de agregado) até limites próximos aos valores máximos discutidos para agregados reciclados (1,0% de SO_4 em massa de agregado reciclado).

Para isso, o revestimento de gesso foi aplicado nos pórticos com espessuras de revestimento fina, média e grossa, em limites viáveis para aplicação em uma única demão, por um gesseiro da região de Socorro (SP), com bastante experiência neste tipo de trabalho.

---

¹⁶ De forma ideal, a análise dos efeitos dos sulfatos na microestrutura das argamassas deveria também abranger e discutir a caracterização dos materiais empregados nos pórticos e outros ensaios importantes de caracterização da microestrutura de materiais minerais. Mas, face ao escopo da investigação ser restrito a um programa de mestrado, previu-se que o aprofundamento de análises de microestrutura apenas seria feito em pesquisas futuras e em função da variação das propriedades apresentadas neste planejamento experimental.

Os 4 pórticos geraram então 4 agregados reciclados que, juntamente com mais 1 agregado de areia normal brasileira (composto em granulometria similar a dos agregados reciclados) foram empregados na produção de argamassas de assentamento de alvenarias com 4 proporções em massa¹⁷ diferentes, gerando assim 20 argamassas.

As proporções de mistura adotadas foram aquelas consideradas viáveis economicamente para utilização de agregados reciclados em substituição aos naturais, na produção de argamassas de assentamento.

Pelos procedimentos adotados, as seguintes variáveis foram então estudadas: teor de contaminação por sulfato nos agregados reciclados, consumo de cimento por m³ de argamassa, tipo de cimento (resistente ou não a sulfatos) e a presença de cal hidratada em algumas das argamassas, com maior consumo de agregado reciclado.

Estas argamassas passaram por um processo de envelhecimento acelerado através da aplicação de ciclos de umedecimento e secagem, com o objetivo de avaliar a contribuição do sulfato presente nos agregados reciclados para a formação de etringita tardia e o efeito desta formação na deterioração de argamassas de assentamento.

Para isso, as argamassas foram curadas inicialmente em câmara úmida¹⁸ por 7 dias e depois mantidas em câmara seca até os 63 dias de idade. A partir disso foram submetidas a ciclos de umedecimento e secagem até os 175 dias de idade, buscando favorecer a dissolução do sulfato e a formação de reações expansivas.

Alguns corpos-de-prova foram mantidos na câmara seca dos 7 aos 175 dias e serviram como referência para comparação dos resultados obtidos ao longo da ciclagem.

---

¹⁷ Nesta dissertação, adotou-se o termo proporção em massa em substituição ao termo traço, que se utiliza normalmente, por achar-se mais adequado.

¹⁸ Cura justificada no item 3.6.4.

As alterações apresentadas pelas argamassas dos 63 aos 175 dias foram monitoradas através de ensaios de resistência mecânica, análise de microestrutura e medidas periódicas da estabilidade dimensional, na expectativa de se avaliar a ocorrência ou não da deterioração das argamassas, em função do uso de agregados reciclados contaminados por sulfatos provenientes do revestimento de gesso.

A Figura 3.1 mostra um fluxograma das etapas consideradas no desenvolvimento do programa experimental.

Figura 3.1 – Fluxograma representativo do programa experimental.

3.3 Materiais utilizados na produção das argamassas

Para a moldagem das argamassas foram utilizados: cimento CP III 32 RS, cimento CP II F 32, cal hidratada CH III, agregado de areia normal brasileira e os 4 agregados reciclados resultantes da britagem de pórticos construídos com e sem a aplicação de revestimento de gesso.

3.3.1 Cimentos

Como a formação da etringita está condicionada à quantidade de C_3A e de sulfatos, foram utilizados dois cimentos com diferentes teores de C_3A , como descrito:

- CP III 32 RS – O cimento resistente a sulfato (baixo teor de C_3A) foi adotado para tentar dificultar o processo de deterioração em estudo, avaliando o caráter preventivo do uso deste cimento nas argamassas com agregado reciclado, já que a NBR 7211 (ABNT, 1987) autoriza o uso de agregados com limites superiores aos estabelecidos, desde que um cimento RS seja usado. Além disto trata-se de cimento muito comum na região de Socorro-SP, escolhida como estudo de caso neste trabalho.
- CP II F 32 – Por possuir teor mais elevado de C_3A , este cimento reflete condições mais favoráveis à formação de etringita, permitindo uma avaliação mais crítica dos limites de contaminação das argamassas em estudo. Por outro lado, pode ter efeitos preventivos na formação de etringita tardia, segundo Kuzel (1996).

A caracterização da composição química dos cimentos foi feita por fluorescência de Raios-X. De forma complementar, foram realizadas as seguintes análises: densidade de massa específica por picnômetro de Hélio, termogravimetria, difração de Raios-X e granulometria a laser. Os resultados obtidos estão descritos no item 4.1.1.

3.3.2 Cal hidratada

Em argamassas de cimento produzidas com agregados reciclados comuns, o uso da cal nem sempre é necessário, pois, em geral, o teor de materiais pulverulentos neste

tipo de agregado já propicia às argamassas coesão, plasticidade e trabalhabilidade necessárias para sua utilização. (Miranda; Selmo, 1999)

A cal hidratada CH III foi usada apenas em dois grupos de argamassa com menor teor de cimento, para garantir uma maior quantidade de aglomerante e ainda trabalhabilidade adequada às misturas. A cal foi também utilizada em todas as quatro argamassas com a areia normal brasileira, para garantir trabalhabilidade, já que essa areia não apresenta finos abaixo de 0,15 mm, ao contrário dos agregados reciclados empregados.

O uso da cal também neste caso serviu ainda para se reproduzir situações de obra, já que a adição de cal em argamassas é prática bastante comum.

Em obras visitadas pela autora em Socorro (SP), onde os agregados reciclados da usina de reciclagem Irmãos Preto foram utilizados em argamassas de assentamento, alguns pedreiros relataram usar a cal por motivos de hábito, mesmo sem necessidade do ponto de vista de trabalhabilidade.

A caracterização da composição química da cal hidratada foi feita por fluorescência de Raios-X. De forma complementar, foram realizadas as seguintes análises: densidade de massa específica por picnômetro de Hélio, termogravimetria, difração de Raios-X e granulometria a laser.

3.3.3 Agregados reciclados

3.3.3.1 Produção e homogeneização

Visando focar apenas o fenômeno em estudo e em função da grande variabilidade da composição granulométrica e mineralógica que existe em torno dos resíduos de construção e demolição (Miranda, 2000; Angulo, 2000), optou-se por produzir artificialmente os agregados reciclados a serem usados na pesquisa, a fim de eliminar variáveis que pudessem dificultar a análise dos resultados obtidos e conclusões acerca das variáveis em estudo.

Nos pórtycos construídos para a produção artificial dos agregados reciclados, os tijolos maciços utilizados foram produzidos em olaria da região de Socorro (SP), pois também é possível que haja contaminação por sulfatos no solo usado para fabricação

de cerâmica vermelha da região, cujo processo é artesanal e com temperatura de queima heterogênea.

Buscou-se reproduzir proporcionalmente a composição teórica de concreto, alvenaria e argamassa existente em obras, e se usou o modelo de pórtico de Crescêncio (2003). Foram construídas quatro unidades de 2,00 m x 1,50 m x 0,20 m de alvenaria de tijolo maciço, envolvidas por um elemento de concreto, configurando um pórtico conforme o esquema mostrado na Figura 3.2. Estes pórticos receberam aplicação posterior de emboço de argamassa mista e de revestimento de gesso.

Figura 3.2 – Esquema do pórtico base para produção dos agregados reciclados.

Os tijolos foram assentados de uma vez, por ser uma característica construtiva da região de Socorro (SP) fazer as paredes externas assim. As casas térreas dificilmente utilizam concreto estrutural e a única armação é feita com barras de ferro assentadas no próprio tijolo a meia altura e ao final do pé direito.

Mesmo assim uma estrutura de concreto com elementos de pequenas dimensões foi prevista, conforme a Figura 3.2, pela presença do concreto aumentar o teor de C_3A no agregado reciclado e, portanto, ser mais crítico para o processo de deterioração em estudo. Dessa configuração resultaram as relações volumétricas e em massa estimadas no Anexo 7.1.

O procedimento inicial na construção dos pórticos foi executar um baldrame de 30 cm, que serviu de apoio. Depois foram confeccionadas as vigas inferiores, sob as

quais foram assentadas as alvenarias. No dia seguinte foram executadas os pilaretes e concretadas as vigas superiores de fechamento, conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Pórticos construídos para a produção do agregado reciclado.

Após prazo superior a 7 dias, as fôrmas foram retiradas e depois foi executado um emboço de argamassa, que foi mantido seco e protegido de intempéries. Em torno de 30 dias depois da aplicação do emboço, três dos pórticos foram revestidos com gesso, nas duas faces, como mostra a Figura 3.4. No Anexo 7.2 consta a caracterização do gesso empregado.

Amostras dos materiais empregados no pórtico (concreto, alvenaria e emboço, com e sem revestimento de gesso) foram extraídas antes da sua trituração para a geração dos agregados e visando estudos futuros, em caso da necessidade de se aprofundar a interpretação científica deste trabalho. A análise química do gesso empregado no revestimento dos pórticos foi considerada básica e consta anexo, no item 7.2.

Figura 3.4 – Aplicação de revestimento de gesso nos pórticos.

Em cada um dos 3 pórticos com revestimento de gesso, a pasta fresca foi aplicada em espessuras diferentes, para gerar espessuras finais e contaminações de sulfato diferentes. As contaminações por sulfatos previstas estão descritas na Tabela 3.1 e foram planejadas para resultar nos valores teóricos indicados na última coluna (ver Anexo 7.1).

Tabela 3.1 – Pórticos geradores dos agregados reciclados produzidos.

Pórtico	Composição do pórtico gerador do agregado	Espessura do revestimento de gesso	Teor previsto* (SO ₄ , % em massa)
P1	Concreto e alvenaria, com aplicação de emboço de argamassa mista	-	≅ 0,0
P2	Concreto e alvenaria, com aplicação de emboço de argamassa mista e revestimento de gesso	Fina (5 mm)	≅ 1,2
P3	Concreto e alvenaria, com aplicação de emboço de argamassa mista e revestimento de gesso	Média (10 mm)	≅ 2,4
P4	Concreto e alvenaria, com aplicação de emboço de argamassa mista e revestimento de gesso	Grossa (15 mm)	≅ 3,5

* Estimativa teórica a confirmar pela análise química.

Após cerca de 60 dias do revestimento de gesso executado, o próximo passo foi a demolição e britagem dos pórticos, demolidos integralmente usando-se marreta e martetele hidráulico e depois britados em moinho de 2 martelos, da marca Maqbrit, modelo 4020, mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Britador usado na produção dos agregados reciclados.

O material resultante da britagem de cada pórtico foi colocado em três caixas plásticas. Depois disso, foram retirados 50 kg de material de cada caixa e misturados durante 5 minutos numa betoneira de eixo vertical, da marca Alfa.

Esse procedimento foi repetido até que todo o material das caixas fosse homogeneizado na betoneira. Parte do material homogeneizado foi então levado à estufa a 100 °C¹⁹ para secagem até constância de massa.

A Figura 3.6 mostra os agregados após a britagem e sendo preparados para a colocação na estufa. Depois o material foi ensacado para ser usado posteriormente nos ensaios de caracterização dos agregados e na moldagem das argamassas.

Figura 3.6 – Agregados reciclados após moagem e homogeneização.

3.3.3.2 Identificação dos agregados reciclados

A partir dos pórticos descritos na Tabela 3.1, foram gerados quatro tipos de agregados, denominados A1, A2, A3 e A4, como descrito na Tabela 3.2. O valor teórico de sulfatos aqui informado é apenas uma previsão teórica e foi estimado conforme o Anexo 7.1.

Tabela 3.2 – Agregados reciclados produzidos.

Agregado reciclado produzido	Pórtico base gerador do agregado	Teor de sulfato previsto* (SO₄, % em massa)
A1	P1	0,0
A2	P2	≅ 1,2
A3	P3	≅ 2,4
A4	P4	≅ 3,5

* Estimativa teórica a confirmar pela análise química.

¹⁹ Muito embora essa temperatura possa ter gerado desestabilização do dihidrato de contaminação dos agregados, considerou-se necessário garantir a secagem inicial dos agregados, a fim de se obter uma correta dosagem da água de amassamento.

3.3.3.3 Caracterização dos agregados reciclados

Para a caracterização química e física dos agregados foram realizados os ensaios de composição granulométrica, densidade de massa aparente,²⁰ densidade de massa específica, teor de materiais pulverulentos, absorção de água e termogravimetria, no CPqDCC – PCC/USP; difração de Raios-X, análise química por fluorescência de Raios-X e granulometria a laser no LCT – PMI/USP; sulfatos solúveis e sais solúveis totais no IPT.

A Tabela 3.3 resume os ensaios realizados na caracterização dos agregados reciclados:

Tabela 3.3 – Ensaios de caracterização dos agregados reciclados.

Estado	Ensaio	Método
Pulverizado*	Composição química e mineralógica	FRX, TG e DRX
	Teor de sais totais e sulfatos solúveis	NBR NM 50/86
	Sulfatos totais	NBR NM 16/04
	Sulfatos por métodos expeditos	Item 3.3.3.3, b
	pH e condutividade em extrato aquoso	Item 3.3.3.3, b
	Resíduo insolúvel	Item 3.3.3.3, c
Granular**	Absorção de água	Item 3.3.3.3, d
	Teor de materiais pulverulentos	NBR NM 46/01
	Densidade de massa específica	Picnômetro de Hélio
	Densidade de massa aparente	NBR 7251/82
	Composição granulométrica	NBR NM 248/03 e granulometria a laser

*Para a descrição do que significa o estado pulverizado, ver a alínea a, a seguir.

** O estado granular se refere ao agregado da maneira como foi empregado nas argamassas apenas britado e homogeneizado como descrito em 3.3.3.1.

Da caracterização relacionada na Tabela 3.3 cabe comentar os procedimentos a seguir:

²⁰O termo densidade de massa aparente é aqui adotado em respeito à terminologia preconizada pela ABNT.

a) Preparação das amostras dos agregados para análises químicas

Para realização dos ensaios de análise química e teor de sais totais e sulfatos solúveis, os materiais foram moídos em moinho de mandíbula, depois em moinho de rolo, homogeneizados por quarteamento e em seguida submetidos à pulverização, no LCT – PMI/USP, em moinho oscilatório Herzog, com recipiente de moagem de aço cromo. Segundo informações do Prof. Dr. Henrique Kahn, este procedimento pode adicionar à mostra um aumento de 0,1 a 0,3% no teor de ferro.

Esse mesmo procedimento foi adotado posteriormente para a preparação das argamassas no estado endurecido quando foram submetidas aos mesmos ensaios.

b) Caracterização química e mineralógica

A caracterização da composição química e mineralógica dos agregados reciclados foi feita através de 3 métodos complementares entre si: fluorescência de Raios-X (FRX), difração de Raios-X (DRX) e termogravimetria (TG).

A FRX serve para que se conheçam os principais elementos químicos básicos constituintes dos agregados e aglomerantes, expressos na forma de óxidos elementares. A análise foi realizada no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP (LCT).

A DRX permite caracterizar os principais minerais constituintes dos materiais em análise. A análise foi efetuada pelo método do pó, mediante o emprego do difratômetro de Raios-X, marca Philips, modelo MPD 1880. A análise foi também realizada no LCT-EPUSP.

Os objetivos da termogravimetria estão descritos a seguir. O equipamento usado pertence ao Laboratório de Microestrutura do Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP e os parâmetros de ensaio estão registrados nos anexos, no item 7.7.5.

A termogravimetria é uma técnica na qual a variação de massa de uma espécie química é medida em função da temperatura, enquanto a mesma é submetida a uma programação controlada de temperatura. Para que a termogravimetria produza informações úteis, a amostra deve liberar algum produto volátil, o qual pode ser originário de vários processos físicos e/ou químicos.

Para as análises deste trabalho foi utilizada a termogravimetria dinâmica, técnica na qual a amostra é aquecida num ambiente cuja temperatura está variando de uma maneira pré-determinada, preferencialmente a uma razão linear.

As curvas termogravimétricas (curvas TG) indicam a perda de massa em faixas de temperatura. Por resultados de referência e conhecendo-se as temperaturas de desidratação ou de desidroxilação dos compostos em estudo, pode-se estimar as transformações ocorridas e ponderar se eles estão presentes ou não no material em análise. De forma ideal, esta técnica deve ser complementada por análise termodiferencial (ATD), mas isto implicaria no aprofundamento da análise microestrutural das argamassas e não seria prudente realizar no âmbito desta dissertação, priorizando-se outros ensaios físicos e mecânicos relacionados ao fenômeno em estudo.

Assim, para fins de análise da TG neste trabalho, as faixas de temperatura consideradas foram adotadas por consulta a Zampieri (1993); Guimarães (1998); Perkins; Palmer (1999), Taylor (1997), e estão indicadas na Tabela 3.4.

Cabe salientar que por necessidade de limitação da abordagem na microestrutura das argamassas, não serão interpretadas as variações nas curvas TG e DTG entre 300 °C e 600 °C e acima de 950 °C e nem serão detalhadas as faixas pertinentes a carbonatos, além do que consta na Tabela 3.4. Isto porque para detalhar esses intervalos seria imprescindível caracterizar de forma exaustiva a composição mineralógica dos agregados reciclados e das pastas simples e mistas dos aglomerantes usados na produção das argamassas.

Tabela 3.4 – Faixas de temperatura consideradas neste trabalho para análise básica das curvas TG.

Faixa de temperatura (°C)	Reação interpretada
< 80	Perda de água livre ⁽¹⁾
80 – 125	Perda de água combinada (etringita; gipsita) ou de água adsorvida
110 – 120	Desidratação do C-S-H
125 – 180	Conversão de dihidrato para hemidrato ⁽²⁾
80 – 400	Perda de água adsorvida ou combinada total
400 – 550	Desidroxilação do Ca(OH) ₂

550 – 800	Descarbonatação inicial do CaCO_3 e total de magnesita
800 – 1000	Final da descarbonatação CaCO_3 e de dolomita

(1) Adotado com base em publicações mais recentes; (2) Faixa incluída com base na Tabela 2.2.

Além de Taylor (1997), a faixa de temperatura adotada para a desidratação da etringita foi também embasada pelos estudos de Perkins; Palmer (1999), que analisaram a curva termogravimétrica de uma etringita sintética (Figura 3.7) e constataram que:

- a perda de massa total pela volatilização das moléculas de água da etringita corresponde a 33% da perda de massa total deste composto na termogravimetria e acontece até os 200 °C;
- até 125 °C, a perda de massa ocorrida é de 32% e pode-se, portanto adotar a faixa indicada na Tabela 3.4.

Figura 3.7 – Análise termogravimétrica de etringita sintética. (Adaptado de Perkins;Palmer, 1999),

Os sais solúveis totais e os sulfatos solúveis estão relacionados à contaminação das amostras pelo gesso de construção, tema principal deste trabalho. O método utilizado pelo IPT para a determinação dos sais solúveis foi baseado em Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003a) e na NBR NM 50 (ABNT, 1996). Por este método, 20 g da amostra são dissolvidos em 100 mL de água em temperatura ambiente e depois agitada por 10 minutos em agitador mecânico, depois disso segue-se o procedimento da NBR NM 50 (ABNT, 1996).

Para análise de sulfatos solúveis foram ainda efetuadas medidas utilizando-se fitas colorimétricas, por método rápido de Seele, adaptado por Selmo e Galeni²¹, e com medidas complementares de pH e condutividade.

As fitas colorimétricas preconizadas por Seele são usadas pelo IGS na forma de um kit e aplicada originalmente para a avaliação de sulfatos em águas agressivas a concretos de cimento portland.

A fita colorimétrica de sulfatos é semi-quantitativa e determina faixas de sulfato através de comparação visual com uma escala de referência. Cada combinação de cores representa um número, que varia de 0 a 4.

O método foi testado e adaptado para as medidas em agregados reciclados por Selmo *et al.* (2004), como mostra a Figura 3.8 e fez-se aqui a medida dos sulfatos em soluções filtradas de 100 g do agregado com 200 mL de água de torneira, por ter sido essa a usada no preparo das argamassas.

Na graduação da fita colorimétrica, a escala arbitrada como zero indica uma concentração de SO_4 menor que 200 mg/L e a escala 4 representa uma concentração de SO_4 maior que 1600 mg/L e as soluções de ensaio devem ter pH entre 4 e 8. A Tabela 3.5 detalha melhor as leituras possíveis com a fita testada.

Tabela 3.5 – Interpretação dos teores de sulfato determinados através do kit IGS alemão. (Adaptado de Selmo *et al.*, 2004)

Intervalo de viragem (mg/L de sulfatos)	Dosagem nominal (mg/L de sulfatos)	Escala medida
Não há viragem	$\text{SO}_4^{-2} < 200$	0
300 a 400	$\text{SO}_4^{-2} > 400$	1
600 a 800	$\text{SO}_4^{-2} > 800$	2
1000 a 1200	$\text{SO}_4^{-2} > 1200$	3
1300 a 1600	$\text{SO}_4^{-2} > 1600$	4

²¹ Selmo, S. M. S. Relatório de auxílio de visita. Dr. Ing. Hab Jörg Seele. Projeto FAPESP 03/08076-4, de agosto 2004.

O pH da solução e a leitura dos sulfatos com a fita foram realizados para os tempos de 10 min, 1 h, 2 h e 48 h do preparo das soluções com água de torneira. A condutividade foi caracterizada tanto para as soluções com 48 h, quanto para outras para feitas com água deionizada, para se confirmar dados obtidos naquele prazo. O condutivímetro usado foi de correção automática de temperatura e da marca Radiometer Copenhagen, Modelo CDM 210. Uma fita colorimétrica semiquantitativa importada foi usada para as leituras de pH.

Figura 3.8 – Ensaio semiquantitativo de sulfatos, através de método rápido do IGS, da Alemanha, e adaptado por Selmo *et al.* (2004).

Este método aqui foi aplicado a título de caracterização complementar e para se avaliar o efeito do tempo de imersão do agregado em água, nos resultados do teor de sulfatos solúveis, pois trata-se de um método semi-quantitativo a ser aplicado em controle de campo ou para triagem inicial de amostras.

c) Resíduo insolúvel

O agregado reciclado contém aglomerantes que são solubilizados por ataque ácido e o teor de materiais inertes pode ser avaliado pelo resíduo insolúvel. Na fração aglomerante pode haver fonte de alumínio e ferro na forma de C_3A e C_4AF , envolvidos na formação de etringita.

Para a determinação do resíduo insolúvel, o seguinte procedimento, baseado em Angulo (2004) foi adotado:

- Secar o material em estufa até constância de massa;
- Pesar aproximadamente 1 g da amostra;

- Adicionar 25 mL de água fria;
- Durante a dispersão, juntar 5 mL de HCl;
- Aquecer por aproximadamente 15 min com temperatura próxima à ebulição;
- Adicionar 50 mL de água quase fervendo e continuar a fervura com temperatura próxima a ebulição por aproximadamente 15 min;
- Filtrar a solução com papel filtro médio (Schleicher & Schuell) ϕ 110 mm;
- Lavar totalmente o becker, o papel filtro, e o resíduo com água quente;
- Efetuar a queima do papel filtro com o resíduo.
- Pesar o cadinho com o material que sobrou após a queima.

O resíduo insolúvel é calculado através da Eq. 3.1:

$$RI = 100 \times \frac{m_f}{m_i} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde: RI = Resíduo insolúvel, em %;

m_f = Massa da amostra após a queima, em g;

m_i = Massa inicial da amostra, em g.

d) Absorção de água

A absorção dos agregados reciclados não pôde ser avaliada pelo método da NBR 9777 (ABNT, 1987), pois o teor de finos elevado não possibilitava detectar o estado saturado superfície seca exigido pelo ensaio.

Decidiu-se então utilizar o método desenvolvido por Galeni e Selmo, onde a absorção é determinada com o agregado reciclado no estado saturado superfície úmida, descrevendo um resultado que se aproxima mais da água de molhagem das argamassas. Este método está descrito a seguir:

- Secar a amostra até constância de massa;
- Vedar a saída de um funil de plástico com um tampão e massa de calafetar;
- Colocar no funil um papel filtro molhado e sobre ele 400 g de agregado reciclado misturado com 200 g de água destilada;
- Deixar em repouso por períodos de tempo pré-estabelecidos (por exemplo, 10 min, 1h, 2h, 24 h);

- Após o intervalo de tempo estabelecido, abrir o fundo do funil e deixar a água escorrer por 10 minutos;
- Retirar uma parcela do material retido no papel filtro;
- Colocar no filtro do Kitassato e acomodar com 20 golpes de soquete;
- Aplicar 2 minutos de vácuo a 50 mm Hg;
- Coletar parte da amostra, pesar e levar à estufa a 100 °C por um período maior ou igual a 24 horas. O cálculo da absorção é feito através da Eq. 3.2:

$$A = 100 \times \frac{m_i - m_f}{m_f} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde: A = Absorção no estado saturado superfície úmida, em %;

m_i = Massa inicial da amostra úmida, recolhida do funil para secagem, em g;

m_f = Massa da amostra seca a 100 °C após vácuo, em g.

e) Composição granulométrica

Permite caracterizar o tamanho das partículas constituintes dos aglomerantes e agregados em estudo. Para determinação da composição granulométrica foi utilizado o método da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e também foi feita a determinação por granulometria a laser.

A granulometria do agregado com areia normal brasileira foi composta de maneira a se tornar similar à granulometria obtida para o agregados reciclados produzidos, conforme descrito em 3.3.4.

3.3.4 Agregado com areia normal brasileira (AN)

A granulometria do agregado AN, composto essencialmente por areia normal brasileira (laudo IPT no Anexo 7.4), foi baseada na média das curvas granulométricas obtidas para o agregados reciclados produzidos, como descrito a seguir:

Adotou-se a média da granulometria dos quatro agregados em cada uma das frações, desprezando-se a fração fina e a fração retida na peneira 1,2, já que a areia normal só está disponível nas dimensões de 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm.

Para compor a granulometria da areia normal brasileira de maneira similar a granulometria apresentada pelos agregados reciclados, foi feito o seguinte cálculo:

Primeiro foi feita uma média das porcentagens retida em cada peneira, considerando a porcentagem média de cada agregado.

Tabela 3.6 – Porcentagem média de agregado reciclado retida nas peneiras.

Peneiras	Massa retida na peneira (g)				Massa média (g)	% retida na peneira	% retida e acumulada
	A1	A2	A3	A4			
4,8	10,8	12,8	12,6	11,3	11,9	1,2	1,2
2,4	44,5	65,3	58,6	61,4	57,4	5,7	6,9
1,2	102,7	109,8	103,7	110,9	106,8	10,7	17,6
0,6	195,5	185,9	183,6	190,2	188,8	18,9	36,5
0,3	221,3	207,4	214,2	209,9	213,2	21,3	57,8
0,15	198,1	187,8	194,2	184,3	191,1	19,1	76,9
fundo	227,1	231,0	233,2	232,1	230,8	23,1	100,0
Total	1000	1000	1000	1000	1000	100	-

Somando-se as porcentagens passantes na peneira apenas das granulometrias disponíveis na areia normal brasileira, temos:

Tabela 3.7 – Porcentagem média de agregado reciclado retido nas peneiras de mesma granulometria da areia normal brasileira.

Peneira	1,2	0,6	0,3	0,15	Total
% passante na peneira	10,7	18,9	21,3	19,1	70,0

Então se fez uma regra de 3 inversa:

- Se em 100% a peneira 1,2 representava 10,7% de material retido, em 70% qual é a porcentagem que ela representa?

Seguindo esta linha de raciocínio, chega-se aos valores da tabela seguinte, que são as porcentagens usadas neste trabalho para a composição da granulometria da areia normal brasileira.

Tabela 3.8 – Composição granulométrica utilizada para o agregado AN.

Granulometria	1,2	0,6	0,3	0,15	Total
Composição	15,3 %	27,0 %	30,5 %	27,3 %	100 %

A Tabela 3.9 mostra um exemplo para a utilização de 6 kg de agregado AN.

Tabela 3.9 – Exemplo de composição granulométrica para 6 kg de agregado AN.

Granulometria (mm)	1,2	0,6	0,3	0,15	Total
Porcentagem (%)	15,3 %	27,0 %	30,5 %	27,3 %	100 %
Composição (kg)	0,92	1,62	1,83	1,64	6,00

Cabe por fim comentar que outros critérios poderiam ter sido utilizados na composição de AN para mais similar a sua granulometria ficar em relação aos agregados reciclados, mas isto iria adicionar teor de finos excessivos na composição granulométrica das argamassas de AN, não usual para o emprego aqui considerado e sobretudo perante as normas adotadas na definição do seu proporcionamento.

3.4 Proporcionamento das argamassas

3.4.1 Com os agregados reciclados

A escolha das proporções em massa procurou privilegiar proporções econômicas para argamassas de assentamento de alvenarias e viáveis para a utilização de agregados reciclados.

Foram adotadas as seguintes proporções, em massa:

- **1 : 6 (cimento : agregado reciclado)** – esta proporção foi adotada por representar um consumo de cimento usual em argamassas de assentamento de alvenarias enterradas ou estruturais;
- **1 : 9 (cimento : agregado reciclado)** – esta proporção foi adotada por representar um consumo de cimento usual em argamassas de assentamento de alvenarias de vedação;
- **1 : 1 : 12 (cimento: cal : agregado reciclado)** – esta proporção em massa foi prevista para gerar o maior teor de contaminação por sulfato nas argamassas, em função da proporção elevada de agregado presente. A cal foi usada para proporcionar maior risco para a formação de etringita. Por ser a proporção em massa com maior teor de contaminação optou-se por usar os dois tipos de cimento (alto e baixo teor de C_3A), para melhor avaliar os efeitos da contaminação por sulfatos e da influência do cimento, ainda que em menor consumo nessa proporção de mistura.

3.4.2 Com areia normal brasileira

A areia normal brasileira não tem a porcentagem de finos que tem o agregado reciclado (3.3.4). Em função disso, em todas as proporções em massa onde este agregado foi utilizado, o uso da cal foi necessário para proporcionar coesão à argamassa.

Manteve-se a proporção “AN : cimento” idêntica à do agregado reciclado, mas incluindo a cal em teores próximos aos prescritos por normas internacionais (Selmo *et al*, 2002) e como pode ser visto nas proporções em massa a seguir:

- **1 : 1 : 6 (cimento : cal : areia normal brasileira);**
- **1 : 2 : 9 (cimento : cal : areia normal brasileira);**
- **1 : 3 : 12 (cimento : cal : areia normal brasileira).**

3.5 Identificação das argamassas

Com base no que foi descrito, foi criada uma identificação para as argamassas, conforme sua proporção em massa e variando-se o tipo de agregado.

Foram então criados os grupos de sigla G6, G9, G12 e G12F, que tem respectivamente, teores de agregados em massa iguais a 6, 9 e 12. O Grupo G12F identifica o grupo no qual o cimento utilizado foi o CP II F 32, ao contrário dos outros, onde o cimento empregado foi o CP III 32 RS.

A identificação das argamassas foi de numeração corrida, de T1 a T20 e ao longo dos grupos, seguiu sempre a ordem de utilização dos agregados: A1, A2, A3, A4 e AN.

A identificação das argamassas, suas respectivas proporções em massa e materiais constituintes se encontram na Tabela 3.10. Com relação à identificação das condições de cura adotadas neste trabalho e explicadas nos itens 3.6.4 e 3.6.5, acrescentou-se a **sigla NC** ao número ao código das argamassas quando mantidas em câmara seca e para diferenciar da condição de ciclagem lá explicada.

Tabela 3.10 –Detalhamento das argamassas moldadas para desenvolvimento do estudo.

Argamassa		Componentes secos (kg)											Água (kg)	Massa total (kg)	Relação a/c total	Finos totais (%)
		Cimento		Cal CH III	Agregado reciclado				Areia normal brasileira (AN)*							
		CP III 32 RS	CP II F 32		A1	A2	A3	A4	1,2	0,6	0,3	0,15				
G6	T1	1	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	1,8	8,8	1,8	29,5
	T2	1	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	1,8	8,8	1,8	28,9
	T3	1	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	1,8	8,8	1,8	28,8
	T4	1	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	1,8	8,8	1,8	28,3
	T5	1	-	1	-	-	-	-	0,92	1,62	1,83	1,64	1,5	9,5	1,5	25,0
G9	T6	1	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	2,7	12,7	2,7	26,0
	T7	1	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	2,7	12,7	2,7	25,3
	T8	1	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	2,7	12,7	2,7	25,2
	T9	1	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	2,7	12,7	2,7	24,8
	T10	1	-	2	-	-	-	-	1,37	2,43	2,74	2,46	2,25	14,25	2,25	25,0
G12	T11	1	-	1	12	-	-	-	-	-	-	-	4	18	4	29,5
	T12	1	-	1	-	12	-	-	-	-	-	-	4	18	4	28,9
	T13	1	-	1	-	-	12	-	-	-	-	-	4	18	4	28,8
	T14	1	-	1	-	-	-	12	-	-	-	-	4	18	4	28,3
	T15	1	-	3	-	-	-	-	1,83	3,24	3,65	3,28	3	19	3	25,0
G12F	T16	-	1	1	12	-	-	-	-	-	-	-	4	18	4	29,5
	T17	-	1	1	-	12	-	-	-	-	-	-	4	18	4	28,9
	T18	-	1	1	-	-	12	-	-	-	-	-	4	18	4	28,8
	T19	-	1	1	-	-	-	12	-	-	-	-	4	18	4	28,3
	T20	-	1	3	-	-	-	-	1,83	3,24	3,65	3,28	3	19	3	25,0

* A soma das frações resulta sempre em 6, 9 ou 12, conforme o grupo considerado.

** Porcentagem relativa ao total de materiais secos

3.6 Metodologia de moldagem das argamassas

3.6.1 Definição da água de mistura das argamassas

Baseada na fixação da consistência em 275 ± 20 mm, medida de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 1995), foi determinada a relação a/c necessária para a proporção 1:6 (relação cimento:agregado reciclado). A partir disso, através de uma regra de três, considerando-se a relação a/c para este grupo e a relação agregado/cimento dos outros grupos de argamassa, determinou-se a relação a/c para as demais proporções em massa (Tabela 3.10), conforme metodologia de Selmo (1988).

Para as argamassas de agregado reciclado com cal na proporção 1:1:12 (cimento:cal:agregado reciclado), a relação a/c encontrada pela regra de três foi corrigida por tentativas, baseada no índice de consistência fixado, já que a cal possui elevada área específica e não estava presente nos dois primeiros grupos, resultando numa quantidade de água adicionada um pouco maior do que a relação a/c calculada inicialmente.

Para as argamassas com areia normal brasileira, foram feitos ajustes a partir da relação a/c encontrada para as argamassas com agregado reciclado pertencentes ao mesmo grupo.

3.6.2 Método de mistura das argamassas

O seguinte procedimento foi usado como método de mistura das argamassas, similar ao de Miranda (2000):

- Colocar a água na argamassadeira de eixo planetário;
- Adicionar o agregado seco e misturar por 30 segundos em velocidade lenta;
- Deixar repousar por 9,5 minutos com a cuba coberta²²;

---

²² Esse tempo de repouso é adotado como o mínimo para que o agregado reciclado não absorva posteriormente a água necessária para manter a trabalhabilidade da argamassa, sendo que este tempo pode variar em função do agregado reciclado.

- Adicionar o cimento (ou o cimento e a cal pré-homogeneizados a seco), em 30 segundos, em velocidade lenta;
- Misturar por mais 1 minuto, em velocidade rápida.

3.6.3 Preenchimento das fôrmas e adensamento

Para realização dos ensaios foram moldados 30 corpos-de-prova de 4 cm x 4 cm x 16 cm de cada uma das vinte argamassas sendo este tipo de corpo-de-prova prescrito pela EN 1015 – Part 11.

Fôrmas triplas foram preenchidas em camada única e o adensamento foi feito através da aplicação de 20 golpes de adensador mecânico, da marca ELE, sendo este um procedimento adotado por Miranda (2000).

Os 30 corpos-de-prova de cada argamassa foram produzidos em duas amassadas, com os seguintes procedimentos:

- 24 foram moldados de uma única amassada, para garantir a homogeneidade dos espécimes a serem submetidos à ciclagem. Para isto, foram utilizadas dez fôrmas triplas. Os corpos-de-prova utilizados no mesmo ensaio e para mesma idade de ensaio foram escolhidos de 3 fôrmas diferentes, buscando-se garantir a representatividade do processo de moldagem. Estes corpos-de-prova foram utilizados para a realização de todos os ensaios físicos e mecânicos, exceto variação dimensional;
- 6 restantes foram moldados de uma segunda amassada e foram utilizados no ensaio de variação dimensional.

Uma descrição da identificação dos corpos-de-prova e de sua utilização se encontra na Tabela 3.11 e na Tabela 3.12.

Tabela 3.11 – Descrição da utilização dos corpos-de-prova da amassada 1.

Identificação dos CP's	Ensaio	Idade do ensaio (dias)	N.º de ciclos após 63 dias
1,2 e 3	Resistência mecânica	63	nenhum
4, 5 e 6	Resistência mecânica	91	2
7, 8 e 9*	Resistência mecânica	119	4
13, 14 e 15	Resistência mecânica	175	8
16, 17 e 18**	Módulo dinâmico	63, 91, 119 e 175	nenhum
	Resistência mecânica	175	
A, B e C	Absorção e porosidade aparente	63	nenhum
D, E e F	Formação de eflorescências	175	nenhum

* Corpos-de-prova de numeração 10 a 12 seriam ensaiados ao final de 6 ciclos completos, mas continuaram em ciclagem em função da pesquisa de Shiroma (2004).

**Corpos-de-prova não ciclados e mantidos constantemente na câmara seca para serem submetidos a ensaios de resistência mecânica aos 175 dias de idade, como fator de comparação com os corpos-de-prova submetidos à ciclagem e ensaiados com a mesma idade. Também utilizados para determinação do módulo de elasticidade dinâmico aos 91 e 119 dias de idade.

Tabela 3.12 – Descrição da utilização dos corpos-de-prova da amassada 2.

Identificação dos CP's	Ensaio	Idade do ensaio (dias)	N.º de ciclos
G, H e I	Variação dimensional	Dos 63 aos 175 dias, de 7 em 7 dias	8
J, K e L	Variação dimensional	Dos 63 aos 175 dias, de 7 em 7 dias	nenhum

A ciclagem adotada está descrita no item 3.6.5.

3.6.4 Cura inicial das argamassas

O processo de cura adotado foi a cura úmida, através da permanência em câmara úmida por sete dias após a moldagem (23 ± 2 °C; >95% U.R.), levando-se em consideração os seguintes aspectos:

- Este tipo de cura é hoje adotado por normas européias de controle de qualidade de argamassas de assentamento;
- O prazo de cura úmida inicial mais prolongado poderia melhor viabilizar o processo de formação da etringita, de forma parcial ou completa, de modo que nos ensaios cíclicos pudessem ser observados apenas os seus efeitos de cristalização e dissolução parcial na microestrutura das argamassas.

Assim, após a moldagem, os corpos-de-prova foram levados nas próprias fôrmas para a câmara úmida, desformados após 72 horas e colocados novamente na câmara úmida, onde permaneceram até os 7 dias de idade, sendo então levados até a câmara seca (23 ± 2 °C; $50\pm 4\%$), onde permaneceram até os 63 dias de idade.

3.6.5 Ciclos de umedecimento e secagem

A presença de água é fundamental para a solubilização do sulfato e é uma das condições para que ocorra a deterioração por sulfatos provenientes de contaminação interna.

O efeito do uso de agregados contaminados por sulfatos nas argamassas foi avaliado pela aplicação de ciclos de umedecimento e secagem nas argamassas, procurando-se acelerar o seu processo de deterioração de forma a viabilizar um processo alternado de solubilização e cristalização dos sais solúveis.

O objetivo desta ciclagem foi acelerar o processo de deterioração das argamassas, porém não de uma forma muito drástica, procurando desenvolver condições que são facilmente encontradas, como uma semana de chuvas, por exemplo, seguida de uma semana de clima quente e mormaço.

A cura inicial em câmara úmida por 7 dias serviu para que as primeiras reações pudessem acontecer normalmente, propiciando a formação de etringita e depois disso foi sucedida da permanência em câmara seca até os 63 dias de idade, para que os corpos-de-prova atingissem considerável estabilidade dimensional e de massa.

A escolha dos ciclos foi feita com base ainda nos seguintes critérios:

- Vários estudos indicaram que os ciclos de molhagem e secagem são agressivos e têm sido usados para analisar a formação de etringita tardia e então se optou por adotar a ciclagem dos corpos-de-prova com molhagem. A molhagem (ou umedecimento, o que é mais adequado no caso deste estudo) é necessária para a dissolução dos íons sulfato e ocorrência das reações químicas;
- A secagem permite analisar permite gerar tensões internas pelos efeitos da cristalização de sais formados na fase úmida;

- A secagem adotada foi feita em estufa ventilada mantida a 40 °C, uma temperatura não agressiva para os produtos do gesso, possibilitando que a temperatura não entre como variável de análise dos resultados, pois os íons sulfato não serão provenientes da decomposição térmica da etringita primária.

Em função destes critérios, o procedimento de ciclagem adotado foi o seguinte: após os 63 dias de idade, os corpos-de-prova foram retirados da câmara seca e submetidos a ciclos de 14 dias, executados da seguinte maneira:

- 7 dias de umedecimento, através da permanência em câmara úmida (23 ± 2 °C; $>95\%$ U.R.), diretamente sobre as prateleiras molhadas. Optou-se por este tipo de molhagem para prevenir a lixiviação dos sais, que poderia ocorrer caso os corpos-de-prova fossem imersos;
- 7 dias de secagem em estufa ventilada à temperatura de 40 °C, tendo-se previamente avaliado que este prazo permitiria a perda total da água absorvida durante os 7 dias de umedecimento previstos no ciclo.

Este procedimento foi repetido por 8 vezes, ou seja, por 8 ciclos completos.

3.7 Resumos dos ensaios realizados e métodos empregados

A Tabela 3.13 relaciona os ensaios realizados neste programa experimental para as argamassas no estado plástico e endurecido.

Os ensaios objetivaram a caracterização das argamassas no estado plástico, a caracterização inicial das argamassas no estado endurecido aos 63 dias de idade, a variação de resistência mecânica ao longo da ciclagem e a caracterização final das argamassas no estado endurecido aos 175 dias de idade.

Corpos-de-prova de referência foram mantidos na câmara seca dos 7 até os 175 dias de idade, quando foram ensaiados e suas propriedades comparadas com as dos corpos-de-prova ciclados até os 175 dias de idade e também com os corpos-de-prova caracterizados na idade de 63 dias.

Tabela 3.13 – Ensaios realizados para estudo das argamassas.

Caracterização	Ensaio	Método
Estado plástico	Índice de consistência	NBR 13276/95
	Densidade de massa aparente	NBR 13278/95
Estado endurecido propriedades físicas e mecânicas	Resistência à compressão	EN 1015 Part 11
	Resistência à tração na flexão	EN 1015 Part 11
	Módulo de elasticidade estático	Item 3.9.5
	Módulo de elasticidade dinâmico	Item 3.9.6
	Absorção de água	Item 3.9.7
	Densidade de massa aparente	NBR 13280/95
	Variação dimensional	EN 1015 Part 13
Estado endurecido microestrutura	Composição química	FRX, TG e DRX
	Teor de sais totais e sulfatos solúveis	NBR 9917/87
	Susceptibilidade à formação de eflorescência	Item 3.11.2

Os itens 3.8 a 3.11 explicam de forma resumida os ensaios da Tabela 3.13.

3.8 Caracterização das argamassas no estado plástico

3.8.1 Índice de consistência

Este ensaio serviu como parâmetro para se ter uma medida da trabalhabilidade das argamassas, avaliando a sua adequação no assentamento de alvenarias. O método utilizado foi o da NBR 13276 (ABNT, 1995b).

3.8.2 Densidade de massa aparente

O objetivo deste ensaio foi calcular o consumo efetivo de cimento e dos agregados por metro cúbico das argamassas, no estado fresco. Para isso foi utilizado o método da NBR 13278 (ABNT, 1995a).

3.8.3 Consumo de materiais e custo estimado por m³

Com os resultados obtidos em 3.8.2, foram calculados os consumos de cimento e dos outros materiais constituintes das argamassas, através da Eq. 3.3.

$$C_{cim} = \left(\frac{\delta_{arg}}{(1 + p + q + a/c)} \right) \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde: C_{cim} = Consumo de cimento por m^3 , em kg/m^3 ;

δ_{arg} = Densidade de massa aparente da argamassa no estado fresco, em kg/m^3 ;

p = Massa de agregado miúdo (agregado reciclado ou areia normal brasileira) na proporção da argamassa, em kg;

q = Massa de cal na proporção da argamassa, em kg;

a/c = Relação água/cimento da argamassa

Seguindo a proporção relativa entre os constituintes das argamassas, é possível calcular o consumo para os outros materiais.

3.9 Caracterização inicial das argamassas aos 63 dias de idade

Esta caracterização foi feita aos 63 dias de idade, quando os corpos-de-prova deixaram a câmara seca para serem submetidos aos ciclos de umedecimento e secagem. Esses dados servem como de referência para comparação da deterioração acelerada das argamassas depois de submetidas aos ciclos de umedecimento e secagem já descritos.

A Figura 3.9 mostra corpos-de-prova aos 63 dias de idade, antes de serem submetidos aos ensaios de resistência mecânica.

Figura 3.9 - Corpos-de-prova de 4 cm x 4 cm x 16 cm aos 63 dias de idade.

3.9.1 Fluorescência de Raios-X e termogravimetria

A microestrutura das argamassas foi analisada de forma parcial²³ através da fluorescência de Raios-X (FRX) , da termogravimetria (TG) e das análises químicas descritas em 3.9.2.

A FRX foi feita após os ensaios mecânicos de 63 dias de idade.

A primeira TG foi feita também após os 63 dias de idade e seus resultados foram comparados com os obtidos após os 2 ciclos completos (91 dias de idades) e 8 ciclos completos (175 dias de idade, inclusive para argamassas mantidas em câmara seca e não cicladas – de sigla NC).

Foram utilizados restos de pedaços de corpos-de-prova rompidos durante os ensaios de resistência mecânica. O procedimento adotado para o preparo das amostras para TG foi o mesmo descrito no item 3.3.3.3, a) e a interpretação dos seus resultados foi também conduzida conforme o item 3.3.3.3, b).

Deve-se por fim salientar que a quantificação de etringita ou de monossulfoaluminatos nas argamassas deste estudo pode requerer métodos e técnicas de caráter muito avançado, que não os usuais de DRX, e considerou-se além do escopo deste mestrado, envolver uma identificação precisa desses minerais, sem antes avaliar os problemas de deterioração, como os principais visados no programa experimental (prejuízos em resistência mecânica e aptidão à eflorescência).

3.9.2 Teor de sais solúveis totais e de sulfatos solúveis

Como já descrito, o objetivo da realização destes ensaios nas argamassas com 63 dias de idade, antes de iniciar a ciclagem, foi avaliar as alterações na microestrutura das argamassas, comparando seus resultados com aqueles obtidos durante e ao final da ciclagem, aos 175 dias de idade. Como idade intermediária de controle adotou-se 91 dias, ou seja, depois da aplicação de 2 ciclos completos.

---

²³ De forma ideal, a análise dos efeitos dos sulfatos na microestrutura das argamassas deveria também abranger e discutir a caracterização dos materiais empregados nos pórticos e outros ensaios importantes de caracterização da microestrutura de materiais minerais.

O método utilizado para a determinação destes teores foi o do IPT, através de Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003a) e da NBR NM 50 (ABNT, 1996).

3.9.3 Resistência à tração na flexão

Utilizando os corpos-de-prova 4 x 4 x 16 cm descritos na Tabela 3.11, a resistência à tração na flexão foi determinada de acordo com a norma EN 1015– Part 11 (EN, 1993), com uma velocidade de carregamento de 13 N/s, em uma prensa universal da marca EMIC, modelo DL 10000. Este método foi adotado por Miranda (2000), para estudo de outras argamassas com agregado reciclado e hoje também está sendo normalizado no Brasil.

A Figura 3.10 mostra a realização de um ensaio de resistência à tração na flexão.

Figura 3.10 - Ensaio de resistência à tração na flexão aos 63 dias de idade, em corpos-de-prova 4 cm x 4 cm x 16 cm.

Este procedimento foi aplicado para a determinação de resistência à tração na flexão aos 63, 91, 119 e 175 dias de idade.

O tratamento estatístico destes dados foi feito eliminando-se os resultados que diferiram mais de 30% em relação à média dos 3 resultados. A norma a ASTM C 349 (ASTM, 2002) sugere que a tolerância seja 10% em relação à média, porém, como os valores de resistência à tração na flexão para as argamassas com agregados reciclados têm uma ordem de grandeza baixa, o valor de 10% representaria uma variação muito pequena entre os valores, que deixaria de fora resultados coerentes, por isso decidiu-se adotar a tolerância de 30% com relação à média dos 3 resultados.

3.9.4 Resistência à compressão simples

Com uma metade rompida de cada corpo-de-prova utilizado no ensaio de resistência à tração na flexão, foi realizado o ensaio de resistência à compressão. Este ensaio também foi feito de acordo com a norma EN 1015 – Part 11 (EN, 1993), com uma velocidade de carregamento de 100 N/s, na mesma prensa universal da marca EMIC, modelo DL 10000. Este é o mesmo método adotado por Miranda (2000).

A Figura 3.11 mostra a realização do ensaio em um corpo-de-prova de 63 dias de idade.

Figura 3.11 – Ensaio de resistência à compressão aos 63 dias de idade, em meio prisma com dimensões aproximadas de 4 cm x 4 cm x 8 cm.

Este procedimento foi aplicado para a determinação de resistência à compressão aos 63, 91, 119 e 175 dias de idade.

O tratamento estatístico destes dados foi feito eliminando-se os resultados que diferiram mais de 10% em relação à média dos 3 resultados, de acordo com a ASTM C 349 (ASTM, 2002).

3.9.5 Módulo de elasticidade estático

Usando a metade restante de cada corpo-de-prova rompido no ensaio de resistência à tração na flexão, foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade estático (Figura 3.12), conforme o procedimento adotado por Miranda (2000) e descrito a seguir:

“O ensaio para determinação do módulo de elasticidade à compressão foi realizado em analogia à NBR 7190 (ABNT, 1996) efetuando-se inicialmente dois ciclos de

carga e descarga a 10% e 50% do limite de resistência à compressão medido para cada argamassa. O módulo secante foi calculado para as deformações medidas nesses dois limites, no 3.º ciclo de carregamento, através de dois extensômetros elétricos acoplados em duas laterais opostas de cada corpo-de-prova. A velocidade de carga e descarga adotada foi de 100 N/s. Após atingir 50% da carga de ruptura no terceiro ciclo, os dois extensômetros eram retirados e o corpo-de-prova levado à ruptura.” (Miranda, 2000)

Figura 3.12 – Ensaio de módulo de elasticidade estático aos 63 dias de idade, em meio prisma com dimensões aproximadas de 4 cm x 4 cm x 8 cm.

Este procedimento foi aplicado para a determinação do módulo de elasticidade estático aos 91 e 175 dias de idade. Este ensaio não foi realizado aos 119 dias, por motivos a serem depois apresentados na análise dos resultados.

O tratamento estatístico destes dados foi feito eliminando-se os resultados que diferiram mais de 10% em relação à média dos 3 resultados, de acordo com a ASTM C 349 (ASTM, 2002).

3.9.6 Módulo de elasticidade dinâmico

Este método foi realizado em analogia com o adotado por Velasco (2002), utilizando-se um aparelho de ultra-som da marca Pundit. Embora este ensaio seja inicialmente utilizado para concreto, adotou-se os mesmos procedimentos para analisar as argamassas.

Através da velocidade da onda ultra-sônica e da densidade de massa aparente da argamassa, o módulo de elasticidade dinâmico foi calculado através da Eq. 3.4, a seguir:

$$E = \rho \times v^2 \times \left[\frac{(1 + \mu) \times (1 - 2 \times \mu)}{(1 - \mu)} \right] \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde: E = Módulo de elasticidade dinâmico, em MPa;

ρ = Densidade de massa aparente, em kg/m³;

μ = Coeficiente de Poisson;

v = Velocidade da onda ultra-sônica, em km/s.

A Figura 3.13 mostra a realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 3.13 – Aplicação de ultra-som para cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, aos 63 dias de idade, em prismas 4 cm x 4 cm x 16 cm.

O objetivo dos ensaios 3.9.3 a 3.9.6 foi avaliar se o teor de sulfato nos níveis do estudo tem influência na perda de resistência mecânica das argamassas, mediante a ciclagem aplicada.

Quanto ao módulo, buscou-se estabelecer a sua correlação com a perda de resistência esperada. Com isso pretendeu-se aferir a adequação deste ensaio não-destrutivo para acompanhar a diferença entre os corpos-de-prova ciclados e não ciclados, bem como definir a sua aplicação em futuras pesquisas similares, melhorando-se a sua confiabilidade.

Este procedimento foi aplicado para a determinação do módulo de elasticidade estático aos 63, 91, 119 e 175 dias de idade.

O tratamento estatístico destes dados foi feito eliminando-se os resultados que diferiram mais de 10% em relação à média dos 3 resultados, de acordo com a norma a ASTM C 349 (ASTM, 2002).

3.9.7 Absorção de água

Este ensaio informa sobre a susceptibilidade das argamassas à ação da água, decorrente da sua porosidade. O procedimento de ensaio adotado foi a retirada dos corpos-de-prova da câmara seca e a colocação na câmara úmida por 7 dias (depois de completados os 63 dias de idade), depois mais 24 horas de imersão total em água e secagem em estufa a 100 °C até constância de massa.

A absorção de água foi então calculada pela fórmula a seguir:

$$A = 100 * \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) \quad \text{Eq. 3.5}$$

Onde: A = Absorção de água, em %;

m_1 = Massa da argamassa após 24 horas de imersão em água, em g;

m_2 = Massa final da argamassa após secagem em estufa a 100 °C, em g.

Juntamente com o ensaio de absorção, foi estimada a porosidade aparente das argamassas no estado endurecido, utilizando o procedimento de Selmo (1988), de acordo com a Eq. 3.6, descrita abaixo:

$$P = 100 * \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \right) \quad \text{Eq. 3.6}$$

Onde: P = Porosidade aparente, em %;

m_1 = Massa da argamassa após 24 horas de imersão em água, em g;

m_2 = Massa da argamassa após secagem em estufa a 100 °C, em g;

m_3 = Massa imersa da argamassa após 24 horas de imersão em água, determinada em balança hidrostática, em g.

3.9.8 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 1995c). Os valores de comprimento, largura e altura para o cálculo do volume da argamassa foram determinados através da média de duas medidas de cada dimensão.

3.10 Caracterização durante a ciclagem das argamassas

Uma descrição dos ensaios realizados ao longo dos ciclos pode ser vista na Figura 3.1 ou na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Ensaios realizados durante a ciclagem das argamassas.

Identificação dos CP's	Ensaios	Idade do ensaio (dias)	N.º de ciclos
4, 5 e 6	Resistência à tração na flexão; Resistência à compressão simples; Módulo de elasticidade estático; Módulo de elasticidade dinâmico; Termogravimetria; Sulfatos solúveis e sais solúveis totais.	91	2
7, 8 e 9	Resistência à tração na flexão; Resistência à compressão simples; Módulo de elasticidade dinâmico.	119	4
13, 14 e 15	Resistência à tração na flexão; Resistência à compressão simples; Módulo de elasticidade estático; Módulo de elasticidade dinâmico; Termogravimetria; Sulfatos solúveis e sais solúveis totais.	175	8
G, H e I	Variação dimensional	Dos 63 a 175, de 7 em 7 dias	De 1 até 8

Após 2, 4 e 8 ciclos completos foram realizados ensaios mecânicos com os corpos-de-prova, ou seja, nas idades de 91, 119 e 175 dias e durante este prazo foi controlada a variação dimensional e de massa dos corpos-de-prova ciclados e não ciclados.

Uma análise da microestrutura também foi feita ao final dos 2 primeiros ciclos, ou seja, aos 91 dias, e permitiu acompanhar a evolução do processo de ciclagem nas argamassas. Para esta análise foram realizados os ensaios de TG e sulfatos solúveis e sais solúveis totais. Estes mesmos ensaios foram realizados ao final de 8 ciclos completos.

A partir dos 63 dias, foi iniciada a monitoração da variação dimensional das argamassas. A cada 7 dias, sempre que os corpos-de-prova eram trocados de ambiente (câmara úmida para câmara seca e vice-versa) foram realizadas medidas de controle dimensional. Ao mesmo tempo, os corpos-de-prova que foram mantidos

constantemente na câmara seca após a cura, também eram monitorados com relação a esta propriedade.

Este ensaio buscou verificar a influência do teor de sulfatos dos agregados na estabilidade dimensional das argamassas e detectar sua possível expansão pelo efeito da ciclagem.

Embasado pela literatura técnica (Gallias, 1998; EN, 1993; Fu *et al*, 1995), optou-se por utilizar as formas 4 cm x 4 cm x 16 cm para moldagens dos corpos-de-prova deste ensaio, de acordo com o procedimento da EN 1015 – Part 13.(EN, 1993b)

A Figura 3.14 mostra a realização do ensaio de controle dimensional.

Figura 3.14 – Medida de variação dimensional, em prismas 4 cm x 4 cm x 16 cm.

3.11 Caracterização final das argamassas aos 175 dias de idade

3.11.1 Ensaio mecânicos nas argamassas cicladas e não cicladas

Aos 175 dias de idade, após 8 ciclos completos de umedecimento e secagem, as argamassas foram submetidas aos mesmos ensaios realizados aos 63 dias de idade.

Os corpos-de-prova de argamassa, que não sofreram ciclagem e foram mantidos em câmara seca dos 7 aos 175 dias, também foram submetidos aos mesmos ensaios das argamassas cicladas: resistência à tração na flexão, resistência à compressão simples, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico (conforme descrito em 3.9). Além disso, para estes corpos-de-prova foram realizados também os ensaios de sulfatos solúveis, sais solúveis totais e susceptibilidade à formação de eflorescências, conforme descrito a seguir.

3.11.2 Análise da susceptibilidade à formação de eflorescências

As argamassas foram submetidas a ensaio acelerado de formação de eflorescências, com método adaptado a partir de Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003), de modo a se adequar melhor às condições de temperatura deste estudo, como descrito a seguir:

Os corpos-de-prova 4 cm x 4 cm x 16 cm foram curados conforme descrito em 3.6.4. Após isso foram levados à câmara seca, onde permaneceram até os 175 dias de idade. Foram então rompidos, gerando duas metades.

Cada uma dessas metades foi acondicionada em uma embalagem plástica de tampa vazada na qual foi adicionada água destilada a uma altura de $\pm 3,0$ cm. O sistema foi vedado com silicone e o conjunto levado à estufa ventilada mantida a 40 °C (marca Fanen, modelo 320-E). Com isso conseguiu-se manter uma extremidade do corpo-de-prova constantemente em contato com a água e a outra submetida à evaporação em função da temperatura da estufa.

Após 1 semana, o conjunto foi retirado da estufa e a formação de eflorescências foi avaliada visualmente. A Figura 3.15 mostra um esquema do aparato utilizado para a realização do ensaio.

Figura 3.15 – Esquema representativo do ensaio de eflorescência adaptado de Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003): (a) vista lateral; (b) vista frontal e (c) planta.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas

Os ensaios realizados contemplaram uma caracterização física e química básica dos materiais constituintes das argamassas, aglomerantes e agregados, e os resultados obtidos estão a seguir apresentados.

4.1.1 Aglomerantes

4.1.1.1 Cimento CP III 32 RS

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram resultados de caracterização química do cimento CP III 32 RS usado nas argamassas deste estudo.²⁴

Tabela 4.1.– Cimento CP III 32 RS - Análise química por FRX. (% de massa)

Material	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
Cimento CP III 32 RS	29,8	10,3	1,44	0,43	4,33	49,2	0,20	0,48	0,45	<0,10	0,93	0,67

Pela FRX e ainda que não tenha sido feito o ensaio normal brasileiro de caracterização desses cimentos, os resultados permitem indicar que o cimento CP III 32 RS possivelmente atenderia às exigências da NBR 5735 (ABNT, 1991) quanto ao teor de trióxido de enxofre (limite de 4,0 %) e perda ao fogo – PF (limite de 4,0 %).

Quatro picos importantes apresentados pela curva DTG do CP III 32 RS estão mostrados na Figura 4.1 e ocorreram a 105 °C, 142 °C, 672 °C e 791°C. A curva TG correspondente permite concluir um baixo valor de perda ao fogo de 3,1% no total e que o teor de CO₂ nesta amostra de cimento é de 2,3% (Faixa entre 550 °C e 1000 °C – caracterizada pelo pico IV).

---

²⁴ Em anexo, item 7.5, constam resultados de DRX do cimento CP III 32 RS, a título de caracterização complementar e para um futuro aprofundamento de análises da microestrutura das argamassas estudadas, pois essas precisaram ser limitadas aos recursos, prazos e escopo desta dissertação de mestrado.

Verificou-se um quinto pico ao final da análise (1000 °C) e que também cabe ser interpretado, para melhor interpretação da composição mineralógica deste cimento.

Figura 4.1 – Curvas TG e DTG do cimento CP III 32 RS.

A composição granulométrica desse cimento foi determinada através da granulometria a laser, e os resultados constam no item 7.3.

4.1.1.2 Cimento CP II F 32

A Tabela 4.2, Figura 7.16 e a Figura 4.2 mostram os resultados obtidos para os ensaios com o cimento CP II F 32.²⁵

Pela FRX e ainda que não tenha sido feito o ensaio normal brasileiro de caracterização desses cimentos, os resultados permitem indicar que o cimento CP II F 32 provavelmente atenderia às exigências da NBR 11578 (ABNT, 1991) quanto aos teores de óxido de magnésio e trióxido de enxofre, mas não quanto à perda ao fogo - PF (limite de 4,5 %).

²⁵ Em anexo, item 7.5, constam resultados de DRX do cimento CP II F 32 RS, a título de caracterização complementar e para um futuro aprofundamento de análises da microestrutura das argamassas estudadas, pois essas precisaram ser limitadas aos recursos, prazos e escopo desta dissertação de mestrado.

Tabela 4.2.– Cimento CP II F 32 - Análise química por FRX. (% de massa)

Material	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
Cimento CP II F 32	18,2	4,41	2,68	<0,10	2,04	64,0	0,17	0,94	0,21	0,15	2,53	5,64

Quatro picos importantes apresentados pela curva DTG do CP II F 32 estão mostrados na Figura 4.1 e ocorreram a 114 °C, 264 °C, 431 °C e 839 °C.

A curva TG correspondente permite concluir um valor de perda ao fogo de 5,6% no total, o que confirma o resultado da FRX, na Tabela 4.2. Todavia, na faixa em que se poderia evidenciar algum princípio de hidratação neste cimento, o valor da perda de massa é baixo e igual a 0,68 % (picos I e II, com provável inclusão da desidratação de sulfatos). Ainda pela curva TG, na faixa entre 550 °C e 1000 °C – caracterizada pelo pico IV; o teor de CO₂ no cimento CP II F 32 é de 4,2% e atenderia ao limite de norma (4,5 %).

Figura 4.2 – Curvas TG e DTG do cimento CP II F 32

A composição granulométrica desse cimento foi determinada através da granulometria a laser, e os resultados constam no item 7.3.

4.1.1.3 Cal hidratada CH III

A Tabela 4.3 e a Figura 4.3 mostram os resultados obtidos para os ensaios com a cal hidratada.²⁶

Tabela 4.3.– Cal hidratada CH III - Análise química por FRX. (% de massa)

Material	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	5,5	0,55	0,23	<0,10	28,4	41,3	<0,10	0,12	<0,10	<0,10	<0,10	22,1

Para a cal hidratada, os resultados de FR-X permitem deduzir que:

- A cal é de natureza dolomítica, por classificação de Guimarães (1997) e que contém cerca de 41,8 % de MgO e 58,2 % de CaO (base não volátil), com relação²⁷ CaO/MgO igual a 1,455;

Os quatro picos principais apresentados pela curva DTG da Figura 4.3, possivelmente, representam os seguintes compostos:

- Pico I – 107,1 °C – umidade da amostra;
- Pico II – 386,1 °C – decomposição do hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂);
- Pico III – 520,0 °C – decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂);
- Pico IV – 871,1 °C – decomposição do carbonatos.

Pelos picos I e III é possível estimar o total de óxidos hidratados na cal empregada. Pela perda de massa entre 550 °C e 1000 °C e conforme critérios informados no Capítulo 3, é possível ainda estimar que a cal apresentava cerca de 13,8 % de carbonatos, confirmando a classificação do fabricante (CH III) e tem baixo teor de impurezas (ver Tabela 4.4). Assim, possivelmente também atenderia às exigências químicas da NBR 7175/92.

A composição granulométrica da cal foi determinada através da granulometria a laser, e os resultados constam no item 7.3.

²⁶ Em anexo, item 7.5, constam resultados de DRX da cal hidratada, a título de caracterização complementar e para um futuro aprofundamento de análises da microestrutura das argamassas estudadas, pois essas precisaram ser limitadas aos recursos, prazos e escopo desta dissertação de mestrado.

²⁷ É próxima da relação de 1,387, obtida para uma cal dolomítica de extrema pureza.

Figura 4.3 – Curvas TG e DTG da cal hidratada CH III.

Foram ainda realizados outros ensaios com os aglomerantes, mostrados na Tabela 4.4. Cabe salientar que o ensaio de resíduo insolúvel foi feito conforme explicado no Capítulo 3, item 3.3.3 e difere em alguns procedimentos dos ensaios analíticos normalizados pela ABNT para cimento e cal.

Tabela 4.4 – Outras características dos aglomerantes utilizados nas argamassas.

Material	Densidade de massa específica (kg/m ³)	Resíduo insolúvel (%)
Cal hidratada CH III	2.591	0,6
Cimento CP III 32 RS	3.080	2,4
Cimento CP II F 32	2.989	4,1

4.1.2 Agregados reciclados

Os resultados descritos a seguir referem-se a uma caracterização básica dos agregados reciclados. Os agregados são constituídos dos elementos que compunham os pórtilos, ou seja, tijolos de barro cozido (cerâmica vermelha), concreto e argamassas, contendo cimento hidratado, minerais de agregados graúdos e miúdos da Região de Socorro-SP, cal hidratada dolomítica, carbonatos correspondentes e sulfato(s) de cálcio do revestimento de gesso de construção, no caso dos agregados A2, A3 e A4.

A Tabela 4.5 a seguir referem-se à caracterização física dos agregados reciclados e são muito similares para os 4 agregados em estudo, confirmando a homogeneidade do processo de fabricação dos mesmos, a partir do procedimento descrito no Capítulo 3, item 3.3.3.1.

A fração oriunda de compostos cimentícios presentes nesses agregados e acima citada pode ser mensurada através do resíduo insolúvel na Tabela 4.5. Essa fração resultou superior de 2 % até 4 % nos agregados contaminados pelo gesso de revestimento em relação ao agregado não contaminado (A1), embora não coincidente com a contaminação planejada, pela espessura teórica dos revestimentos.

Tabela 4.5 – Caracterização física dos agregados reciclados.

Material	Densidade de massa aparente seca (kg/m³)	Teor de materiais pulverulentos (%)	Densidade de massa específica (kg/m³)	Absorção de água após 24 h (%)	Índice de vazios (%)	Resíduo insolúvel (%)
A1	1.272	17,8	2.719	25,2	53,2	89
A2	1.301	17,1	2.740	28,3	52,5	93
A3	1.264	16,9	2.722	25,7	53,6	91
A4	1.292	16,4	2.715	24,7	52,4	92

Também a homogeneidade no processo de fabricação pode ser confirmada pelas curvas granulométricas médias obtidas para os agregados através da NBR NM 248 (ABNT, 2003), conforme a Figura 4.4.

A composição granulométrica dos agregados reciclados foi determinada também através da granulometria a laser, em água e álcool, e os resultados constam no item 7.3. Para fins de análise do teor de finos nas argamassas com dimensão abaixo de 75 µm adotaram-se os valores obtidos por peneiramento pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Mas, considera-se que as análises a laser também mereceriam objeto de melhor avaliação, pois revelam a presença de frações muito mais finas nos agregados reciclados produzidos do que os resultados obtidos pelo peneiramento a úmido, na Tabela 4.5.

A granulometria do agregado miúdo pode ser um fator importante na formação da etringita, segundo Taylor (1997), portanto, esses resultados similares de composição

granulométrica dos 4 agregados reciclados eliminam essa variável no presente estudo.

Figura 4.4 – Composição granulométrica dos agregados reciclados produzidos.

Os difratogramas de Raios-X dos agregados reciclados estão apresentados no item 7.5. As fichas de minerais identificados como possivelmente presentes também constam no item 7.5, mas devem ser confirmadas.²⁸

O que se pode afirmar é que em função da grande quantidade de quartzo presente e pela contaminação do agregado reciclado se dar em baixos teores de sulfato, houve uma limitação da DRX para identificar a presença do gesso de contaminação, e as informações que podem ser melhor extraídas dos difratogramas dos agregados reciclados são as seguintes:

- Basicamente, não houve diferença significativa entre as análises dos 4 agregados, sendo detectados principalmente quartzo, feldspato e calcita;
- A diferença entre o agregado reciclado de referência (A1) e os agregados reciclados contaminados (A2, A3 e A4) se dá por um pico abaixo de $2\theta = 10^\circ$, indicando a possível presença de algum composto de sulfato.

²⁸ Uma análise mais apurada e com preparação especial das amostras dos agregados e materiais usados na sua confecção, poderia melhor identificar a presença de compostos hidratados do cimento e da cal utilizados na produção dos pórticos, além dos compostos oriundos do tijolo cerâmico, mas considerou-se que extrapolaria os objetivos e prazos desta dissertação.

A Tabela 4.6 mostra os resultados da análise da composição química dos agregados, através da fluorescência de Raio-X.

Tabela 4.6 – Análise química por FRX dos agregados reciclados. (% de massa)

Material	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
A1	65,9	12,2	5,19	<0,10	1,50	6,23	0,45	1,62	1,22	0,10	<0,10	5,77
A2	65,1	11,8	5,41	<0,10	1,62	6,88	0,50	1,58	1,24	0,11	0,12	5,67
A3	65,3	11,4	5,55	<0,10	1,66	7,00	0,52	1,58	1,26	0,11	0,24	5,08
A4	65,5	11,5	5,84	<0,10	1,73	7,08	0,56	1,55	1,31	0,11	0,12	4,69

O que se pode observar através da análise da Tabela 4.6 é que:

- A composição química dos quatro agregados reciclados resultou similar;
- O elevado teor de óxido de alumínio nas quatro amostras é, provavelmente, proveniente de minerais do tijolo cerâmico que foi usado na construção dos pórticos que deram origem aos agregados;
- Os teores de SO₃ da FRX não foram coincidentes com relação aos valores determinados por análise quantitativa do IPT, conforme Anexo 7.6 e adiante ilustrados (Figura 4.11) e apenas a análise quantitativa será considerada na discussão dos resultados.

As curvas termogravimétricas obtidas para os agregados reciclados estão ilustradas nas Figura 4.5 até Figura 4.8.

Figura 4.5 – Curvas TG e DTG do agregado reciclado A1.

Figura 4.6 – Curvas TG e DTG do agregado reciclado A2.

Figura 4.7 – Curvas TG e DTG do agregado reciclado A3.

Figura 4.8 – Curvas TG e DTG do agregado reciclado A4.

De maneira geral, não há diferença entre as curvas termogravimétricas dos quatro agregados reciclados. Os picos principais das curvas DTG que são comuns aos quatro agregados reciclados (identificados em algarismos romanos vermelhos na Figura 4.5 até Figura 4.8) representam possivelmente os seguintes compostos:

- Pico I – entre 114 °C e 120 °C, aproximadamente – esse pico corresponde ao C-S-H e aos sulfoaluminatos;
- Pico II – entre 275 °C e 282 °C, aproximadamente – pode ser atribuído a minerais do tijolo cerâmico que compõem os pórticos geradores dos agregados reciclados;
- Pico III – entre 491 °C e 511 °C, aproximadamente – decomposição de hidróxidos do cimento e da cal hidratados (mais provável portlandita);
- Pico IV – entre 760 °C e 767 °C, aproximadamente – decomposição de carbonatos.

Além desses picos comuns interpretados acima, cabe ainda fazer algumas considerações sobre outros picos observados (identificados em algarismos romanos cor-de-rosa na Figura 4.5 até Figura 4.8):

- a) Além do Pico I, comum aos 4 agregados reciclados, há um ombro adicional, (chamado de Pico V) nas curvas DTG dos agregados A2, A3 e A4 e que não existe no agregado A1. Logo, este pico é resultado da presença do revestimento de gesso nos agregados reciclados contaminados, para efeito deste estudo. A temperatura em que este ombro ocorreu foi entre 133 °C e 142 °C;
- b) Alguns picos menores parecem melhor diferenciados apenas em algumas das curvas, como na de A4 (pico VI a 461 °C), na de A1 (Pico VII a 685 °C), na de A2 (pico VIII a 975 °C) e na de A3 (pico IX a 747 °C). São picos que precisariam ser interpretados com base também em ATG e na completa caracterização de todos os materiais envolvidos na produção dos agregados.

As curvas TG e DTG comparativas entre os quatro agregados reciclados constam na Figura 4.9 e por esta é mais visível o comportamento diferenciado dos picos nos agregados A3 e A4, acima de 500 °C e apontados por setas pretas.

Figura 4.9 – Curvas TG e DTG dos agregados reciclados.

A Tabela 4.7 apresenta um resumo das curvas de TG, segundo a interpretação proposta na Tabela 3.4.

Tabela 4.7 – Resultados extraídos da curva TG dos agregados reciclados.

Temperatura (°C)	Agregados

	A1	A2	A3	A4
Até 80	0,19	0,18	0,19	0,21
80 - 125	0,48	0,46	0,46	0,50
125 – 180	0,55	0,58	0,54	0,61
80 - 400	2,20	2,31	2,17	2,39
400 - 550	1,22	1,33	1,05	0,90
550 - 1000	2,46	2,39	2,66	2,48

Em síntese e de acordo com os dados reunidos com relação à análise termogravimétrica, nas curvas TG e DTG, é possível considerar que:

- a) As perdas de massa das curvas TG, na Tabela 4.7, são similares;
- b) Observa-se que mesmo o agregado reciclado não contaminado, A1, mostrou teores de água combinada consideráveis na faixa atribuída à etringita e gipsita. Isto se explica pelo cimento hidratado, tanto no concreto, quanto nas argamassas de assentamento e revestimento das alvenarias e que deram origem aos agregados em estudo (proporções teóricas relativas no item 7.1);
- c) Além do pico entre 80 °C e 125 °C comum aos 4 agregados reciclados, há um ombro adicional entre 125 °C e 180 °C, nas curvas DTG dos agregados A2, A3 e A4 e que não existe no agregado A1. Logo, este pico é resultado da presença do revestimento de gesso nos agregados reciclados contaminados, para efeito deste estudo;
- d) Existe uma redução gradual e significativa no pico das curvas DTG, na faixa entre 450 °C e 550 °C, e que decresce da curva do agregado não contaminado (A1) para o agregado mais contaminado (A4). Na curva de A4, inclusive, passa-se a ter um pico adicional a 500 °C e não perceptível nos outros agregados menos contaminados, nem no A1. Todavia, é difícil precisar estas alterações, pois é faixa de temperatura associada tanto à portlandita, quanto à transformação de anidrita solúvel em insolúvel, e é provável que esteja associada a este último composto, por estar mais pronunciada apenas no agregado mais contaminado;

Os resultados da determinação de sulfatos solúveis, sais solúveis totais e sulfatos totais (expressos em SO₃) dos agregados reciclados podem ser vistos na Figura

4.10 e Figura 4.11, tendo a determinação sido realizada pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., conforme método descrito em 3.3.3.3 e no Anexo 7.6.

Figura 4.10 – Sulfatos solúveis e sais solúveis totais nos agregados reciclados, determinados pelo IPT.

Figura 4.11 – Teor de anidrido sulfúrico nos agregados reciclados (SO₃ total), comparativo à fração de sulfato solúvel, calculada em SO₃.

Os ensaios mostrados na Figura 4.10 e Figura 4.11 acima, mostram que o teor de sulfatos solúveis dos agregados reciclados não resultou crescente de A2 para A4,

diferindo do que era previsto de acordo com a metodologia estabelecida para a produção dos agregados reciclados²⁹ e explicadas no item 7.1. Mas, verificou-se que:

- Apenas a presença do revestimento de gesso em A2, A3 e A4 aumentou quase 3 vezes o teor de sulfatos solúveis nos agregados reciclados e em quase 2 vezes o teor de sais solúveis totais nesses agregados;
- Os valores obtidos já permitiriam classificar os teores de sulfatos solúveis nos agregados A2, A3 e A4 como potencialmente causadores de nível médio de danos em alvenarias sujeitas à umidade, pela classificação do IGS, resumida na Tabela 2.2. O agregado A1 seria enquadrado como de nível pequeno de danos e possivelmente apenas o agregado de areia normal AN poderia ser enquadrado no nível 0 da classificação IGS (material inócuo).

Quanto aos limites preconizados para agregados reciclados na Tabela 2.3, pode-se dizer que os agregados A2, A3 e A4 não atenderiam aos limites da norma francesa NF P 18 541 (AFNOR, 1994) e italiana UNI 8520-2 (UNI, 1999), mas que são para concreto. A norma DIN 4226-100 é também relativa a argamassas, mas o critério é por método específico que não permite uma comparação direta com os resultados do IPT e uma avaliação aproximada será feita a seguir, pelo método semi-quantitativo do IGS e adaptado para este trabalho, conforme a Tabela 4.8.

Os ensaios complementares da Tabela 4.8 mostram diferenças com relação à solubilidade e íons sulfatos presentes nos agregados reciclados em estudo.

---

²⁹ Seria oportuno averiguar a influência das duas moagens realizadas (preparo dos agregados e preparo das amostras para análises químicas) para melhor esclarecer as diferenças resultantes em relação aos cálculos teóricos da previsão de contaminação.

Tabela 4.8 – Sulfatos solúveis, pH e condutividade em soluções filtradas nos tempos indicados. (Selmo et al, 2004)

Propriedade	Água da solução	Agregado	Idade da solução			
			10 minutos	1 hora	2 horas	24 horas
Sulfatos solúveis (escala da Tabela 3.6)	torneira	A1	0	0	0	0
		A2	2	2	2	1
		A3	2	3	3	2
		A4	3	4	3	2
pH	torneira	A1	9	9	9	7
		A2	8	8	8	7
		A3	7	7	7	6
		A4	7	7	7	6
Condutividade (mS/cm)	torneira	A1	-	-	-	0,455
		A2	-	-	-	1,027
		A3	-	-	-	1,600
		A4	-	-	-	1,662
		Água da solução	72,2	-	-	-
		(°C)	-	-	-	22±1
pH	deionizada	A1	9	9	9	8
		A2	9	9	8	7
		A3	7	7	7	7
		A4	7	7	7	7
Condutividade (mS/cm)	deionizada	A1	1,063	0,686	0,704	0,442
		A2	1,399	1,069	1,069	1,003
		A3	1,728	1,857	1,688	2,057
		A4	1,800	1,271	1,372	1,540
		Água da solução	4,25	-	-	-
		(°C)	21±1	21±1	21±1	21±1

Com relação aos resultados, é interessante que apenas neste ensaio pode-se observar resultados de sulfato crescentes de acordo com o teor de contaminação dos agregados por revestimento de gesso, destacando que o agregado sem revestimento de gesso sempre obteve a escala mínima.

Quanto à medida de sulfatos solúveis nos agregados contaminados (A2, A3 e A4), verifica-se que para todos os tempos de imersão em água dos agregados igual a 10

min, 1 h e 2 h o nível de sulfatos medido foi sempre superior 800 mg/L e chegou resultados acima de 1600 mg/L (1 h de imersão A4) e portanto esses agregados dificilmente poderiam atender ao limite da DIN 4226-100 (600 mg/L).

Quanto ao pH, nota-se mudança na solução com 24 horas, para todos os agregados, quando a solução foi feita com água da torneira. Os resultados de pH foram sempre mais baixos para os agregados A3 e A4.

Com relação à condutividade, ela foi sempre menor para o agregado A1, em todas as soluções analisadas, confirmando-se que o gesso de contaminação introduziu aumento de condutividade nas amostras de A2, A3 e A4, em ordem crescente, de acordo com a contaminação, principalmente nas medidas iniciais (10 minutos de preparo da solução).

4.2 Caracterização das argamassas no estado plástico

As argamassas no estado plástico foram caracterizadas quanto à consistência, densidade de massa aparente e consumo de cimento por m³. Os resultados obtidos estão na Tabela 4.9.

O teor total de finos (partículas com dimensões menores que 75 µm) com base em resultados de análise por peneiramento e lavagem em água está aqui citado para ressaltar que se tratavam de misturas com elevado teor de finos, conforme critérios discutidos por Selmo (1989) e, portanto, resultaram em argamassas com elevada coesão e apenas passíveis de aplicação para assentamento de alvenarias.

Tabela 4.9 – Caracterização das argamassas no estado plástico.

Argamassa		Índice de consistência (mm)	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de finos totais (kg/m ³)
G6	T1	283	1921	218	451
	T2	285	1892	215	435
	T3	255	1943	221	445
	T4	263	1911	217	431
	T5	252	2066	217	435
G9	T6	275	1914	151	392
	T7	268	1917	151	383
	T8	280	1877	148	373
	T9	273	1850	146	361
	T10	281	2101	147	442
G12	T11	297	1851	103	425
	T12	284	1877	104	422
	T13	298	1810	101	405
	T14	300	1797	100	396
	T15	278	2049	108	431
G12F	T16	285	1860	103	427
	T17	272	1868	104	420
	T18	296	1807	100	405
	T19	288	1809	100	399
	T20	284	2060	108	434

O índice de consistência sofreu variação dentro do mesmo grupo, mas manteve-se dentro da faixa especificada de 275 ± 20 mm, com uma tendência maior de espalhamento para G12 e G12F, que continham cal hidratada e maior teor de agregado. Apenas no grupo G6 houve variação de consistência mais significativa dentro do intervalo citado.

A densidade de massa aparente no estado plástico não apresentou variações consideráveis, ficando dentro da faixa de 1800 a 1900 kg/m³ para as argamassas com agregado reciclado e na faixa de 2000 a 2100 kg/m³ para as argamassas com areia normal brasileira. Nessas faixas, a densidade foi maior para o grupo com maior consumo de cimento (G6) e menor para os grupos com menor consumo de cimento e presença de cal (G12 e G12F).

Com exceção do grupo G6, o consumo de cimento é baixo, caracterizando argamassas viáveis economicamente para o assentamento de alvenarias. O baixo consumo de cimento poderia ser um fator a contribuir para a prevenção da formação de etringita, mas em se tratando de agregados com resíduos mistos de concreto isto não se aplica, já que o agregado passa também a ser fonte de C₃A.

Como complementação para a caracterização no estado plástico, foram estimados os consumos por m³ dos outros materiais e foi feita uma estimativa dos custos para as argamassas produzidas, baseados nos valores dos materiais para o mercado de São Paulo em setembro de 2004. Estes dados estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Consumos por m³ e estimativa de custos das argamassas.

Argamassa		Consumo de materiais secos (kg/m ³)				Água (kg/m ³)	Custo por m ³ ** (R\$)
		Cimento	Cal	Agregado reciclado	Areia normal		
G6	T1	218	-	1310	-	393	112,51
	T2	215	-	1290	-	387	110,81
	T3	221	-	1325	-	397	113,79
	T4	217	-	1303	-	391	111,92
	T5	217	217	-	1305	326	155,58*
G9	T6	151	-	1356	-	407	86,37
	T7	151	-	1359	-	408	86,50
	T8	148	-	1330	-	399	84,70
	T9	146	-	1311	-	393	83,48
	T10	147	295	-	1327	332	143,47*
G12	T11	103	103	1234	-	411	85,43
	T12	104	104	1251	-	417	86,63
	T13	101	101	1207	-	402	83,54
	T14	100	100	1198	-	399	82,94
	T15	108	324	-	1294	324	132,73*
G12F	T16	103	103	1240	-	413	85,85
	T17	104	104	1245	-	415	86,22
	T18	100	100	1205	-	402	83,40
	T19	101	101	1206	-	402	83,49
	T20	108	325	-	1301	325	133,44*

* Para estes cálculos, foi usado o valor da areia natural de rio disponível no comércio de São Paulo e não da areia normal brasileira, que é usada especificamente para ensaios e possui custo extremamente elevado.

** Nestes cálculos foram incluídos apenas os valores unitários de custo dos materiais, não levando-se em conta os custos operacionais de produção. Os valores foram: areia de rio: R\$ 45,00/m³; agregado reciclado: R\$ 25,00/m³; cimento: R\$ 20,00/saco de 50 kg e cal hidratada: R\$ 4,00/saco de 20 kg.

Os dados da Tabela 4.10 indicam que, com exceção do grupo G6, existe uma redução média de custo das argamassas de agregado reciclado da ordem de 36 a 40 % em relação a uma argamassa de areia natural quartzosa.

4.3 Caracterização das argamassas de 63 a 175 dias de idade³⁰

Os itens 4.3.1 a 4.3.9 apresentam os resultados dos ensaios realizados para as vinte composições de argamassa, conforme a Tabela 3.11, após a permanência até 63 dias de idade em câmara seca e durante a sua ciclagem, até 175 dias de idade.

As discussões aqui apresentadas se referem apenas às argamassas cicladas, constando no item 5.3 a discussão do comportamento das argamassas que permaneceram na câmara seca dos 7 até os 175 dias de idade.

4.3.1 Densidade, absorção de água e porosidade aparente

A Tabela 4.11 mostra algumas características físicas das argamassas aos 63 dias de idade.

Similarmente aos resultados obtidos para o estado plástico, a densidade de massa aparente não apresentou variação significativa entre as argamassas de mesmo agregado, mas houve uma diferença significativa na densidade das argamassas de agregado reciclado em comparação com as argamassas de areia normal brasileira, o que era esperado, em função da alta porosidade dos agregados reciclados.

A alta porosidade das argamassas com agregado reciclado, comprovada pelos valores de densidade e porosidade aparente é a causa da sua alta absorção de água, que por sua vez tem origem na baixa densidade do agregado reciclado e do baixo consumo de cimento das argamassas.

---

³⁰ De forma ideal a análise das modificações na microestrutura das argamassas deveria também abranger e discutir a caracterização dos materiais empregados nos pórticos e outros ensaios complementares como a análise termodiferencial, a DRX e a microscopia eletrônica de varredura. Conforme já informado, previu-se que o aprofundamento de análises de microestrutura apenas seria feito em pesquisas futuras e em função da variação das propriedades que passam agora a serem discutidas.

Esta porosidade poderia ser considerada como um benefício se a pressão causada pela cristalização interna dos sais fosse minimizada pelos vazios da microestrutura, como discuti Collepardi (2003).

Tabela 4.11 – Caracterização inicial das argamassas no estado endurecido.

Argamassa		Absorção de água (%)	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Porosidade aparente (%)
G6	T1	27	1501	36
	T2	26	1512	34
	T3	26	1486	34
	T4	26	1503	34
	T5	16	1845	25
G9	T6	23	1519	34
	T7	23	1556	34
	T8	23	1503	33
	T9	24	1496	34
	T10	16	1764	27
G12	T11	28	1532	35
	T12	27	1517	34
	T13	27	1518	34
	T14	27	1547	34
	T15	17	1748	27
G12F	T16	26	1518	33
	T17	26	1550	33
	T18	26	1513	31
	T19	26	1501	32
	T20	17	1707	27

4.3.2 Composição química

A Tabela 4.12 mostra os resultados obtidos pela análise por FRX.

Quanto aos óxidos, verifica-se que a composição dos agregados reciclados definiu teores de óxido de alumínio e de ferro muito superiores nas argamassas com eles produzidas do que os apresentados pelas argamassas com agregado de areia normal brasileira. (T5, T10, T15 e T20). Isto era esperado em função dos tijolos cerâmicos usados para a produção dos pórticos que geraram os agregados reciclados.

4.3.3 Teor de sais solúveis totais e de sulfatos solúveis

Os resultados para sulfatos solúveis e sais totais nas argamassas estão mostrados conjuntamente para 63, 91 e 175 dias, na Tabela 4.13 e serão discutidos somente no Capítulo 5, item 5.1.1, dada a sua importância para a interpretação do comportamento na termogravimetria e na variação das propriedades mecânicas das argamassas, analisados a seguir.

Tabela 4.12.– Análise química por FRX das argamassas após ensaios aos 63 dias de idade. (óxidos, em % de massa)

Identificação		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	Perda ao fogo	Total
Grupo	Argamassa													
G6	T1	59,1	11,4	4,75	-*	2,11	12,0	0,42	-*	-*	1,38	0,74	9,07	100,97
	T2	58,3	11,0	5,11	-*	2,14	12,3	0,43	-*	-*	1,37	0,85	8,91	100,41
	T3	58,4	11,1	4,78	-*	2,05	12,6	0,43	-*	-*	1,36	0,49	8,62	99,83
	T4	58,2	10,9	4,87	-*	2,16	12,6	0,44	-*	-*	1,37	1,03	8,77	100,34
	T5	76,0	2,30	0,61	-*	3,73	10,4	<0,10	-*	-*	0,35	0,53	7,39	101,31
G9	T6	59,7	11,3	4,86	0,11	1,95	10,2	0,42	1,40	1,11	<0,10	0,24	8,37	99,66
	T7	58,3	11,0	5,05	0,11	1,99	10,4	0,44	1,37	1,15	<0,10	0,12	8,80	98,73
	T8	58,3	10,8	5,70	0,12	2,12	10,9	0,51	1,36	1,22	0,10	<0,10	8,31	99,44
	T9	59,9	11,0	5,13	0,11	1,93	10,6	0,47	1,42	1,15	<0,10	0,23	8,54	100,48
	T10	74,1	1,72	1,25	<0,10	4,48	9,94	<0,10	0,34	0,22	<0,10	<0,10	8,02	100,07
G12	T11	56,9	10,7	4,93	0,10	3,55	11,3	0,43	1,33	1,09	<0,10	<0,10	10,3	100,63
	T12	56,2	10,4	4,75	0,10	3,43	11,3	0,41	1,32	1,07	<0,10	0,10	11,5	100,58
	T13	56,3	10,7	5,22	0,10	3,59	11,4	0,47	1,35	1,13	<0,10	0,35	10,1	100,71
	T14	55,1	10,0	5,3	0,10	3,65	12,1	0,48	1,29	1,13	<0,10	0,22	11,9	101,27
	T15	74,1	1,57	1,16	<0,10	5,01	9,91	<0,10	0,33	0,21	<0,10	<0,10	8,15	100,44
G12F	T16	55,6	10,2	4,97	<0,10	3,39	12,1	0,42	1,37	1,08	0,10	0,11	11,5	100,84
	T17	54,4	10,5	4,58	<0,10	3,13	11,8	0,37	1,32	0,99	<0,10	0,34	12,3	99,73
	T18	55,3	10,1	4,89	<0,10	3,34	12,3	0,42	1,34	1,06	<0,10	0,21	11,6	100,56
	T19	53,7	9,48	5,34	<0,10	3,65	12,8	0,52	1,28	1,11	0,11	0,19	12,0	100,18
	T20	73,2	1,20	1,34	<0,10	4,92	10,7	<0,10	0,32	0,19	<0,10	<0,10	8,35	100,22

* Valores não informados pelo LCT.

Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios de sulfatos solúveis e de sais solúveis. (conforme item 4.3.3)

Identificação		Sulfatos (SO_4^{-2})				Sais solúveis totais			
Grupo	Argamassa	63 dias	91 dias	175 dias	175 dias NC*	63 dias	91 dias	175 dias	175 dias NC*
G6	T1	0,09	0,11	0,17	0,15	0,44	0,83	0,92	0,98
	T2	0,15	0,19	0,37	0,30	0,63	0,56	1,36	1,21
	T3	0,14	0,20	0,39	0,31	0,64	0,66	1,18	1,01
	T4	0,16	0,24	0,43	0,36	0,66	0,77	1,23	1,00
	T5	0,03	0,02	0,05	0,05	2,36	2,14	1,89	2,14
G9	T6	0,12	0,11	0,16	0,15	0,67	0,61	0,86	0,75
	T7	0,20	0,31	0,38	0,38	0,87	0,86	0,75	1,44
	T8	0,23	0,31	0,48	0,44	0,91	0,84	1,33	1,33
	T9	0,23	0,31	0,49	0,46	0,94	0,98	1,35	1,78
	T10	0,02	0,02	0,05	0,05	2,57	2,14	1,32	1,84
G12	T11	0,12	0,10	0,13	0,12	0,87	0,83	0,76	0,66
	T12	0,15	0,18	0,25	0,21	1,00	0,90	0,69	1,08
	T13	0,19	0,17	0,26	0,25	0,90	0,80	1,00	0,92
	T14	0,15	0,17	0,24	0,30	0,86	0,84	0,92	1,05
	T15	0,04	0,02	0,03	0,05	2,76	1,77	1,94	2,02
G12F	T16	0,07	0,01	0,19	0,08	0,81	0,83	1,68	0,68
	T17	0,10	0,13	0,20	0,12	0,81	0,78	0,84	0,95
	T18	0,10	0,12	0,19	0,17	0,63	0,78	0,98	1,01
	T19	0,09	0,12	0,21	0,02	0,82	0,75	1,01	0,90
	T20	0,04	0,03	0,03	0,15	2,65	2,37	2,25	2,48

* Argamassas não cicladas, mantidas em câmara seca dos 7 aos 175 dias de idade.

4.3.4 Análise da termogravimetria

Os resultados conjuntos da termogravimetria (curvas TG e DTG) por grupos estão ilustrados na Figura 4.12 até a Figura 4.27, por grupo de argamassa. Logo após é feita a análise e interpretação apenas das curvas TG, pela Figura 4.28 até a Figura 4.34 e segundo os critérios informados no Capítulo 3.

Os resultados individuais para cada argamassa, ao longo da ciclagem, estão interpretados no item 5.1.2 e no item 7.7 e podem ser melhor visualizados na Figura 7.22 até a Figura 7.41 (análise básica de alguns picos nas curvas DTG).

Figura 4.12 – Curvas TG e DTG das argamassas após 63 dias – Grupo G6.

Figura 4.13 – Curvas TG e DTG das argamassas após 91 dias – Grupo G6.

Figura 4.14 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias – Grupo G6.

Figura 4.15 – Curvas DT e DTG das argamassas após 175 dias NC – Grupo G6.

Figura 4.16 – Curvas TG e DTG das argamassas após 63 dias – Grupo G9.

Figura 4.17 – Curvas TG e DTG das argamassas após 91 dias – Grupo G9.

Figura 4.18 – Curvas DT e DTG das argamassas após 175 dias – Grupo G9.

Figura 4.19 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias NC – Grupo G9.

Figura 4.20 – Curvas TG e DTG das argamassas após 63 dias – Grupo G12.

Figura 4.21 – Curvas TG e DTG das argamassas após 91 dias – Grupo G12.

Figura 4.22 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias – Grupo G12.

Figura 4.23 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias NC – Grupo G12.

Figura 4.24 – Curvas TG e DTG das argamassas após 63 dias – Grupo G12F.

Figura 4.25 – Curvas TG e DTG das argamassas após 91 dias – Grupo G12F.

Figura 4.26 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias – Grupo G12F.

Figura 4.27 – Curvas TG e DTG das argamassas após 175 dias NC – Grupo G12F.

Para uma análise básica e inicial das alterações ocorridas nas propriedades químicas e microestruturais das argamassas, as curvas termogravimétricas foram separadas nas faixas de temperatura de interesse no estudo, conforme descrito em 3.3.3.3.

Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 4.28 até a Figura 4.33 e são comentados a seguir, para as curvas TG, conforme o grupo e idade das argamassas. Nestas Figuras, NC representa as argamassas não cicladas.

- **Faixa menor que 80 °C**

Esta faixa de temperatura representa apenas a perda da água residual das argamassas, não envolvendo reações de desestabilização da etringita e de interesse neste estudo.

Para todas as argamassas e idades testadas (63, 91, 119 e 175 dias), a perda de massa até 80 °C foi sempre em valores muito baixos e na faixa de 0,1% a 0,4 %, confirmando boas condições de secagem das argamassas, desde a cura inicial em câmara seca até 63 dias e durante todos os finais de ciclos para os ensaios mecânicos. As argamassas com areia normal apresentaram os valores ligeiramente menores, sempre entre 0,1 % e 0,2 %, nos quatro grupos, coerente com a maior densidade do agregado quartzoso.

- **Faixa entre 80 °C e 125 °C**

Essa faixa corresponde à desidratação da etringita, mas também à desidratação inicial do C-S-H e perda final de umidade das argamassas.

Não há diferença significativa de perda de massa entre as argamassas com agregados reciclados, diferenciando-se apenas o de areia normal brasileira, cuja perda de massa é sempre menor do que naqueles, com exceção do grupo G6. Para todas as argamassas com agregado reciclado, a perda de massa foi maior aos 63 dias do que nas outras idades. Nas argamassas com areia normal brasileira, isto variou com a proporção de mistura e foi similar às argamassas de agregado reciclado apenas para o grupo G6.

Dos 63 aos 175 dias percebe-se uma tendência de diminuição da perda de massa nessa faixa de temperatura para todas as argamassas. Nas argamassas com areia normal, isto apenas ocorreu para a proporção de mistura com maior consumo de cimento (T5).

(a) Grupo G6

(b) Grupo G9

(c) Grupo G12

(d) Grupo G12F

Figura 4.28 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas de 30 °C até 80 °C.

(a) Grupo G6

(b) Grupo G9

(c) Grupo G12

(d) Grupo G12F

Figura 4.29 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 80 °C e 125 °C.

- **Faixa entre 125 °C e 180 °C**

Essa faixa corresponde principalmente à conversão de dihidrato para hemidrato, considerando que os demais compostos dos cimentos hidratados são constantes em cada grupo e pelos consumos apresentados na Tabela 4.9. Estes resultados estão coerentes com a diferenciação de sulfatos solúveis, medidos também por análise química.

Nesta faixa, o gesso de construção usado na contaminação dos agregados deve se desidratar, em caso de ter permanecido livre nas argamassas (sem efeitos sobre a formação de etringita). Para uma mesma idade de análise, as argamassas com os agregados contaminados mostraram perda de massa ligeiramente maior, em relação à respectiva argamassa de agregado reciclado não contaminado.

Para todas as argamassas com agregado reciclado, a perda de massa foi maior aos 63 dias do que nas outras idades. Isto pode ser indicativo da ação do sulfato com os aglomerantes ou fase cimentícia também presente nos agregados reciclados.

Observa-se que as análises de G12F resultaram em perdas de massa ligeiramente maiores do que nos demais grupos, seguidas por G6, G12 e G9.

Nesta faixa, porém, a diferença de perda dos 63 dias para as outras idades é bem menor do que nas faixas abaixo de 125 °C, relativas à desidratação da etringita, monossulfoaluminato de cálcio e perda de umidade por difusão da microestrutura das argamassas. O grupo G6 foi o que apresentou comportamento mais similar ao verificado na faixa de temperatura anterior.

- **Faixa entre 400 °C e 550 °C**

Essa faixa corresponde à desidroxilação do Ca(OH)_2 .

Para esta faixa o comportamento se inverte. A perda de massa aumentou com os ciclos, para todas as argamassas com agregado reciclado, possivelmente pelo aumento de cal hidratada no meio, em função da continuação da hidratação do cimento, que pode ter sido retardada pelo elevado teor de finos das argamassas.

Para o grupo G6 este aumento na perda de massa é mais significativo do que nos outros grupos, o que é lógico, já que o consumo de cimento neste grupo é maior.

O resultado da argamassa T16 aos 175 dias não parece estar de acordo com relação às medidas das demais argamassas dentro do mesmo grupo.

Figura 4.30 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 125 °C e 180 °C.

Figura 4.31 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 400 °C e 550 °C.

- **Faixa entre 550 °C e 800 °C**

Esta faixa corresponde principalmente à volatilização de gás carbônico, dos carbonatos de cálcio e de magnésio.

Com exceção de algumas argamassas do grupo G6 (T1, T2 e T5), para a maioria das argamassas com agregados reciclados, é nítido que houve aumento de perda de massa nessa faixa de temperatura, pela evolução da ciclagem. Em outras palavras, pode-se interpretar que houve aumento de carbonatação das argamassas, principalmente nos grupos G12 e G12F, o que está coerente com a adição de cal na proporção original dessas misturas e à secagem adotada na ciclagem.

A maioria das argamassas não cicladas apresentou menor perda de massa a 175 dias do que as cicladas, mostrando menor carbonatação do que as cicladas. Isto está coerente com a ausência de umidade para as condições de cura em câmara seca e ainda pela saída de água livre do sistema, como detectado para a faixa de 80 °C a 125 °C.

- **Faixa entre 800 °C e 1000 °C**

Esta faixa deve principalmente corresponder à volatilização final de gás carbônico de carbonatos.

Os teores de perda de massa ocorridos nessa temperatura foram sempre mais baixos para as argamassas de agregados reciclados do que para as argamassas de areia normal, sendo isto coerente com a adição de cal nas argamassas de areia normal.

De 63 para 175, ao final da ciclagem, houve tendência a aumento de perda de massa nessa faixa de temperatura, indicativo de aumento de carbonatação pela ciclagem. Não há diferença muito nítida de valores das argamassas cicladas em relação às argamassas não cicladas, podendo-se pensar que a faixa anterior (de descarbonatação inicial) foi considerada mais apropriada para a análise desta reação.

- **Faixa entre 80 °C e 1000 °C**

Esta faixa representa a perda total de massa durante a realização do ensaio.

Pode-se notar que, de 63 para 175 dias houve aumento da perda de massa total para todas as argamassas, inclusive as de areia normal brasileira.

Esse aumento na perda de massa ao longo da idade é indicativo que as reações de hidratação e de carbonatação da pasta de cimento continuaram acontecendo ao longo do tempo de ensaio destas argamassas (63 a 175 dias de idade), inclusive para aquelas não cicladas e mantidas em câmara seca.

Os maiores valores de perda de massa, tanto aos 63 quanto aos 175 dias, são para as argamassas do Grupo G12F.

(a) Grupo G6

(b) Grupo G9

(c) Grupo G12

(d) Grupo G12F

Figura 4.32 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 550 °C e 800 °C.

(a) Grupo G6

(b) Grupo G9

(c) Grupo G12

(d) Grupo G12F

Figura 4.33 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 800 °C e 1000 °C.

(a) Grupo G6

(b) Grupo G9

(c) Grupo G12

(d) Grupo G12F

Figura 4.34 – Comparação das perdas de massa nas curvas TG das argamassas entre 80 °C e 1000 °C.

4.3.5 Susceptibilidade à formação de eflorescência

Para os corpos-de-prova mantidos em câmara seca foi realizado ainda o ensaio de susceptibilidade à formação de eflorescência, após os 175 dias de idade. Este ensaio está descrito em 3.11.2.

Para a análise dos resultados, optou-se por dividir os resultados em dois tipos: quando não ocorreu formação de eflorescência e quando ocorreu formação de eflorescência. Neste último caso, foi criada uma classificação empírica para a intensidade da formação de eflorescência, dividindo-a em baixa, média e alta.

A Figura 4.35 mostra alguns exemplos da classificação adotada para a formação de eflorescência, determinados a partir das argamassas deste estudo.

Figura 4.35 – Exemplos de classificação da formação de eflorescência: (a) sem ocorrência; (b) baixa formação; (c) média formação; (d) alta formação.

Com base nesta classificação, os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Análise da formação de eflorescência nas argamassas.

Identificação		Análise da formação de eflorescência			
Grupo	Argamassa	Ocorreu	Intensidade	Local de formação	Cor predominante do sal formado
G6	T1	Sim	Média	Topo e laterais	Branco
	T2	Sim	Média	Topo e laterais	Branco
	T3	Sim	Média	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T4	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T5	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
G9	T6	Sim	Média	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T7	Sim	Média	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T8	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T9	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T10	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
G12	T11	Sim	Baixa	Topo	Branco
	T12	Não	–	–	–
	T13	Sim	Média	Topo	Branco e amarelo
	T14	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T15	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco
G12F	T16	Sim	Média	Topo	Branco e amarelo
	T17	Sim	Média	Topo	Branco e amarelo
	T18	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T19	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo
	T20	Sim	Alta	Topo e laterais	Branco e amarelo

Com base nos resultados da Tabela 4.14 e no estudo de Quarcioni; Chotoli; Aleixo (2003), a formação de sais pode ser proveniente principalmente do hidróxido de cálcio, da cal e do cimento, já que mesmo em todos os traços com areia normal brasileira (T5, T10, T15 e T20) ocorreu a formação de eflorescência e em alta intensidade.

Comparando-se os grupos, de maneira geral, percebe-se que a formação de eflorescência é crescente na seguinte ordem: G12, G6, G12F e G9, sendo este último o de pior comportamento.

Para os grupos G12 e G12 F, nos quais cuja única diferença é o tipo de cimento utilizado, percebeu-se que a formação de eflorescência foi mais intensa no grupo que utilizou cimento com filer do que no grupo de cimento com escória de alto-forno.

Destaca-se ainda que, em todos os grupos, as argamassas de agregado A1 e A2 apresentaram sempre menor intensidade de formação de eflorescências que A3 e A4.

4.3.6 Resistência à tração na flexão

A Figura 4.36 até a Figura 4.39 mostram os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão dos 63 aos 175 dias.

No grupo G9 (Figura 4.37), as argamassas com os agregados reciclados contaminados (A2, A3 e A4) apresentaram tendência a menor resistência à tração do que as de agregado reciclado A1 (sem revestimento de gesso), desde 63 dias de idade. A argamassa com AN apresentou aumento de resistência à tração em função da ciclagem, atingindo o mesmo patamar de resistência que as demais ao final da ciclagem (175 dias).

As tendências acima descritas não foram percebidas no grupo G6.

Nas argamassas com cal, G12 e G12 F (Figura 4.38 e Figura 4.39) também não se verificou a mesma tendência uniforme de influência do agregado reciclado na resistência à tração na flexão das argamassas.

No grupo G12F, as argamassas de areia normal apresentaram inversão de comportamento, mostrando resistência à tração na flexão bem menor, do que as argamassas com agregados reciclados.

Dos 63 aos 119 dias, destacam-se com valores mais elevados de resistência à tração as argamassas de G12 e G12F, com os 4 agregados reciclados, independente da idade de ciclagem, mesmo sendo essas as argamassas de menor consumo de cimento, maior teor de agregado e maior relação a/c (Tabela 3.10); no entanto, estes são justamente os grupos em que a cal hidratada foi empregada nas misturas.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.36 – Grupo G6 – Resistência à tração na flexão média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

Figura 4.37 – Grupo G9 – Resistência à tração na flexão média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.38 – Grupo G12 – Resistência à tração na flexão média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.39 – Grupo G12F – Resistência à tração na flexão média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

4.3.7 Resistência à compressão simples

A Figura 4.40 até a Figura 4.43 mostram os resultados obtidos para a resistência à compressão simples.

No grupo G6, a argamassa com A4 apresentou sempre menor resistência que os demais agregados e a argamassa com AN se destaca com resistência à compressão bem mais elevada, em todas as idades de ensaio.

No G9, todas as argamassas dos agregados A3 e A4 apresentaram menores resistências à compressão do que A1 e A2. A argamassa com AN apresentou resistência à compressão mais elevada apenas ao final da ciclagem (175 dias).

Em G12 e G12F não se verificou influência da contaminação de sulfato na resistência à compressão das argamassas com agregados reciclados. As argamassas deste grupo se destacaram por apresentarem valores de resistência à compressão simples mais elevados do que as dos grupos sem cal, G6 e G9.

No grupo G12F, as argamassas de areia normal apresentaram inversão de comportamento, similar ao que aconteceu com a resistência à tração na flexão, mostrando resistência à compressão bem menor do que as argamassas com agregados reciclados.

De acordo com critérios europeus para as argamassas de assentamento de alvenarias de vedação e estruturais (Selmo et al., 2002), esses valores enquadram as argamassas em níveis de resistência de baixo a médio.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.40 – Grupo G6 – Resistência à compressão simples média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

Figura 4.41 – Grupo G9 – Resistência à compressão simples médio (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.42 – Grupo G12 – Resistência à compressão simples média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.43 – Grupo G12F – Resistência à compressão simples média (MPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

4.3.8 Módulos de elasticidade estático e dinâmico

A Figura 4.44 até a Figura 4.51 mostram os resultados para os ensaios de módulo estático e dinâmico, que serão analisados conjuntamente.

De modo geral essas medidas oscilaram entre 4 GPa e 6 GPa, destacam-se as argamassas dos grupos com cal, G12 e G12F, com valores mais altos dessas propriedades, independente da idade.

Nos grupos em geral, não se verificou efeitos do tipo de agregado reciclado sobre os módulos de elasticidade dinâmico ou estático.

Os grupos que se destacaram por perdas mais expressivas de módulo de elasticidade estático foram os grupos G6 e G12F. Com relação ao módulo de elasticidade dinâmico, os grupos com melhor constância de resultados foram os dois grupos com cal, G12 e G12F, independente da idade.

Ao longo da ciclagem, ambos os módulos cresceram de 63 para 91 dias e se mantiveram com relativa constância de resultados em relação aos 91 dias, para a maioria das argamassas, com exceção da argamassa T5.

De um modo geral, houve uma boa correlação entre os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão simples, conforme apresentado no Anexo 7.9.

Figura 4.44 – Grupo G6 – Módulo de elasticidade estático médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias e (c) 175 dias.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.45 – Grupo G6 – Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

Figura 4.46 – Grupo G9 – Módulo de elasticidade estático médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias e (c) 175 dias.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.47 – Grupo G9 – Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

Figura 4.48 – Grupo G12 – Módulo de elasticidade médio estático médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias e (c) 175 dias.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.49 – Grupo G12 – Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

Figura 4.50 – Grupo G12F – Módulo de elasticidade estático médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias e (c) 175 dias.

(a) 63 dias

(b) 91 dias – 2 ciclos

(c) 119 dias – 4 ciclos

(d) 175 dias – 8 ciclos

Figura 4.51 – Grupo G12F – Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa): (a) 63 dias; (b) 91 dias; (c) 119 dias e (d) 175 dias.

4.3.9 Estabilidade dimensional

A Figura 4.52 e a Figura 4.53 mostram os resultados de estabilidade dimensional das argamassas cicladas e não cicladas dos 63 aos 175 dias de idade.

Por impedimentos operacionais, o controle de variação dimensional somente começou a ser feito a partir dos 63 dias de idade³¹, pela tomada de uma medida por semana até os 175 dias de idade, tanto nos corpos-de-prova ciclados como nos não ciclados.

Assim, as medidas de variação dimensional estão apenas apresentadas em termos de variação milimétrica e a partir de 63 dias de idade, apenas efetuando-se correções com relação à uma leitura de referência em uma barra de aço padrão.

De maneira geral, após a variação dimensional até 63 dias e apenas pelo efeito da ciclagem, as argamassas não apresentaram uma tendência nem de expansão nem de retração. Por vezes expandiram mesmo estando em estufa a 40 °C ou retraíram mesmo após a permanência de uma semana em câmara úmida. Entretanto, há valores de retração mais expressivos e constantes do que as medidas de expansão registradas.

Uma avaliação complementar sobre o comportamento das argamassas na fase inicial de cura e secagem até 63 dias de idade, foi depois providenciada pelo trabalho de Shiroma (2004), e encontram-se no Anexo 7.10, utilizando os mesmos agregados, cimentos, cal e proporções de argamassa similares às deste estudo e as mesmas condições de cura inicial. Pelos dados lá apresentados, estima-se que a retração por secagem das argamassas deve se situar em patamar abaixo de - 0,25 % com estabilização bem além da idade de 35 dias, e isto provavelmente decorre do teor elevado de finos presentes nas argamassas.

Quanto às variações dimensionais registradas após 63 dias de idade, é possível observar que nas argamassas com agregados reciclados e cicladas, houve mais medidas de expansão abrupta nos grupos G6 e G12F e isto até 120 dias. Nas mesmas condições, as argamassas de agregado AN apresentaram alguma tendência à

---

³¹ As medidas precisavam ter sido registradas desde a desfôrma dos corpos-de-prova e com frequência de duas a três determinações por semana nos primeiros 28 dias.

expansão em idades próximas a 80 e 120 dias e após mostraram melhor tendência à estabilidade dimensional.

Os grupos de argamassas não cicladas terão seu comportamento interpretado no item 5.3.1.

(a) Grupo G6

(b) Grupo G9

(c) Grupo G12

(d) Grupo G12F

Figura 4.52 –Variação dimensional média das argamassas cicladas com relação ao comprimento aos 63 dias de idade (mm): (a) G6; (b) G9; (c) G12 e (d) G12F.

Idade (dias)

(a) Grupo G6

Idade (dias)

(c) Grupo G12

Idade (dias)

(b) Grupo G9

Idade (dias)

(d) Grupo G12F

Figura 4.53 – Variação dimensional média das argamassas não cicladas com relação ao comprimento aos 63 dias de idade (mm): (a) G6; (b) G9; (c) G12 e (d) G12F.

5 DISCUSSÃO FINAL

Este capítulo de discussão final dos resultados abrange uma melhor interpretação dos efeitos da ciclagem nas propriedades químicas e mecânicas das argamassas, assim como o comportamento dos corpos-de-prova de referência, mantidos em câmara seca.

5.1 Efeitos da ciclagem nas propriedades químicas das argamassas

5.1.1 Análise dos teores de sulfatos solúveis e sais solúveis totais

A Figura 5.1 e a Figura 5.2 mostram os resultados de sulfatos solúveis e sais solúveis totais nas argamassas ao longo do tempo.

Para os agregados reciclados em estudo, cabe ressaltar as seguintes observações de ordem geral:

- Aos 63 dias, para todas as argamassas com agregado reciclado, independente do consumo ou do tipo de cimento usado, os teores de sulfatos solúveis se mostram entre os limites de risco baixo a médio, para o desempenho e a durabilidade de alvenarias expostas à umidade, pelos critérios de Seele apresentados na Tabela 2.2;
- Com a evolução dos ciclos, ou seja, de 63 para 175 dias, para as argamassas com agregado reciclado e maior consumo de cimento, sem a adição de cal (G6, G9), os teores de sulfatos solúveis aumentaram para valores que enquadrariam todas essas argamassas como sendo de risco potencial médio, para a durabilidade de alvenarias expostas à umidade, pelo critério de Seele (Tabela 2.2), independente do agregado reciclado usado;
- Apenas nas argamassas com o uso de cal hidratada (G12 e G12F) observou-se uma tendência à estabilização do teor de sulfatos solúveis até 175 dias;

- Apenas as argamassas de agregados reciclados com o cimento com fíler (G12F) não ultrapassaram o limite de risco médio para o desempenho de alvenarias. Isto é muito coerente com a importância da presença de CO_2 para a conversão completa do monossulfoaluminato em etringita, segundo Kuzel (1996), conforme discutido no Capítulo 2;
- Apenas nas argamassas com os agregados A1 e AN, os teores de sulfato solúveis permaneceram estáveis, independente do teor de agregado, do tipo ou do consumo de cimento e do número de ciclos aplicados.

Essas considerações permitem enquadrar os agregados reciclados contaminados com revestimento de gesso, como potencialmente deletérios para o desempenho de argamassas expostas à umidade.

Cabe ainda salientar a coerência dos resultados de SO_3 total dos agregados, pois os teores de sulfatos solúveis encontrados para as argamassas ao longo das idades não ultrapassam o limite de SO_3 total determinado para os agregados reciclados.

Figura 5.1 – Sulfatos solúveis nas argamassas.

Analisando os sais solúveis totais na Figura 5.2, percebe-se que:

- Nas argamassas com agregados reciclados contaminados dos grupos G6 e G9, os valores de sais solúveis totais cresceram para 175 dias;

- Para os grupos G12 e G12F as alterações de sais totais foram muito pequenas, independente do agregado reciclado usado, novamente confirmando melhor comportamento do grupo G12, conforme já mostrado pelo ensaio de susceptibilidade à formação de eflorescência conforme o item 4.3.5;
- Para as argamassas com AN, os valores diminuíram gradativamente de 63 para 91 dias e praticamente não houve alteração em G6 e G12F, nessas mesmas idades;
- Os resultados de sulfatos solúveis para as argamassas com agregado reciclado mostraram melhor correlação com os resultados do ensaio de susceptibilidade à formação de eflorescência do que as medidas de sais solúveis totais, ao contrário do que ocorreu para as argamassas com areia normal brasileira.

Figura 5.2 – Sais solúveis totais nas argamassas.

5.1.2 Análise geral das curvas DTG por argamassa

A Figura 7.22 até a Figura 7.41 mostram as curvas TG e DTG obtidas para cada argamassa ao longo do tempo. A análise das curvas TG consta na Figura 4.28 a Figura 4.34, no item 4.3.4, e a seguir será feita uma análise geral e resumida das curvas DTG correspondentes:

- Em todas as argamassas com agregado reciclado, na faixa entre 80 °C e 125 °C, a intensidade do pico diminui com a idade, sendo bem menor aos 175 dias do que era aos 63 dias;
- De uma maneira geral, o que se pode perceber é que, na faixa entre 80 °C e 125 °C, dentro de cada grupo, as argamassas de areia normal (T5, T10, T15 e T20), desde os 63 dias de idade, apresentaram picos de intensidade bem menor do que as argamassas com os agregados reciclados, evidenciando o efeito dos agregados reciclados na microestrutura das argamassas;
- Não há diferenças significativas nas curvas DTG para a mesma argamassa ao longo das idades de 63, 91 e 175 dias, no que diz respeito ao aparecimento de novos picos;
- Para os grupos G12 e G12F, há um pico na faixa de 400 °C e 550 °C, que não existia em G6 e G9 e que pode ser atribuído à adição de cal hidratada nestas argamassas;
- Para o grupo G12F, há ainda um pico adicional na faixa entre 125 °C e 400 °C. Fora isso, não há diferença entre as curvas DTG de G12 e G12F, sugerindo que o tipo de cimento não teve influência evidente sobre os produtos formados nestes dois grupos e pelo tipo de análise aqui considerada;
- Na faixa de temperatura dos carbonatos, verificou-se que para 15 das 16 argamassas com agregado reciclado houve aumento da decomposição de carbonato em temperaturas mais baixas (650 °C a 700 °C), conforme o aumento de idade das argamassas. Isto apenas não se verificou apenas para a argamassa T17, na Figura 5.3.

No item 7.7 há uma interpretação mais detalhada dos picos existentes nas curvas DTG das 20 argamassas, mas deveriam ser revisadas a partir de análises de DRX, que foram dispensadas pelo escopo e objetivos desta dissertação. Cabe lembrar que a identificação mais precisa de compostos envolvidos na reação de sulfatos em materiais cimentícios não pode ser avaliada por técnica convencional de DRX.

5.2 Efeito da ciclagem nas propriedades mecânicas das argamassas

Para melhor analisar as mudanças de comportamento ocorridas nas argamassas ao longo do tempo, com relação à resistência mecânica, calculou-se a variação destes valores com relação à idade de 63 dias. Também foram comparados, dentro de cada grupo, os valores obtidos para as argamassas com relação aos resultados obtidos para as que usaram o agregado reciclado de referência (A1).

Os resultados podem ver vistos da Figura 5.6 até a Figura 5.11, e permitem observar os seguintes aspectos, conforme itens 5.2.1 a 5.2.3, a seguir.

5.2.1 Resistência à tração na flexão

Inicialmente, 16 das 20 argamassas apresentaram aumento de resistência à tração nos dois ciclos iniciais, ou seja, na ciclagem entre 63 e 91 dias, com exceção das argamassas T4, T7, T16, T17 e T19, que utilizaram, respectivamente, os agregados: A4, A2, A1, A2 e A4. Mas mesmo para estas a perda de resistência à tração na flexão foi pouco significativa (menor que 5% para 4 das argamassas citadas).

Aos 175 dias de idade todas as 16 argamassas de agregados reciclados perderam resistência à tração em proporção significativa, de 9% a 35% da resistência inicial aos 63 dias.

Na análise de cada grupo, pela Figura 5.4, as argamassas que apresentaram maior perda de resistência à tração na flexão com relação aos 63 dias foram T1 (A1), T7 (A2), T14 (A4) e T19 (A4).

Apenas as 4 argamassas de areia normal mantiveram ao final da ciclagem nível de resistência à tração maior do que o apresentado com 63 dias de idade. Quando se compara os resultados obtidos com relação ao agregado reciclado de referência (A1), na Figura 5.5, pode-se perceber que, dentro dos grupos, para todas as idades, as argamassas com A3 e A4 apresentam valores de resistência à tração na flexão bem menores do que as argamassas com A1. As únicas exceções acontecem com o grupo G12F aos 63 e 91 dias, onde o menor valor de resistência à tração na flexão foi o da argamassa com A2 e com o grupo G12, aos 175 dias, para o A4.

Figura 5.4 – Variação percentual da resistência à tração na flexão com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade.

Figura 5.5 – Variação da resistência à tração na flexão com relação à respectiva argamassa de A1 em cada grupo e idade.

5.2.2 Resistência à compressão simples

Como pode ser observado na Figura 5.6, a ciclagem entre 63 e 91 dias promoveu um aumento expressivo de resistência à compressão para a maior parte das argamassas, destacando-se principalmente o grupo G6.

Na continuação da ciclagem, esse ganho de resistência foi progressivamente perdido para a maior parte das argamassas, sendo mais expressivo para as que foram confeccionadas com agregados reciclados e CP III 32 RS (T2, T3, T4, T6, T7, T8, T9, T16, T17, T18 e T19).

As únicas argamassas que não apresentaram sinais significativos de perda resistência progressiva entre 91 e 175 dias foram: T5, T10, T15, T20 e T1, respectivamente, as de areia normal e a do agregado reciclado não contaminado por gesso e com consumo de cimento mais elevado (200 kg/m^3).

O fato do aumento de resistência coincidir com os primeiros ciclos de umedecimento e secagem levou à suposição da formação de algum produto de hidratação ou de carbonatação, em função da molhagem sofrida pelas argamassas durante a permanência na câmara úmida.

De maneira geral, as argamassas com A3 foram as que apresentaram maior perda de resistência à compressão, com relação aos 63 dias, em todos os 4 grupos (Figura 5.6).

Quando se comparam os resultados obtidos com relação ao agregado reciclado de referência (Figura 5.7), pode-se perceber que, dentro dos grupos, para todas as idades, as argamassas com A3 e A4 apresentam valores de resistência a compressão simples bem menores do que as argamassas com A1, com exceções nos grupos G12 e G12F.

Figura 5.6 – Variação percentual da resistência à compressão com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade.

Figura 5.7 – Variação da resistência à compressão simples com relação à respectiva argamassa de A1 em cada grupo e idade.

5.2.3 Módulo de elasticidade (estático e dinâmico)

A ciclagem entre 63 e 91 dias promoveu aumento expressivo de módulo dinâmico para os grupos G6 e G9, conforme a Figura 5.8 e Figura 5.9. Entretanto, na idade final, a maioria das argamassas desses dois grupos apresentou redução do módulo estático e do módulo dinâmico.

Os resultados de módulo dinâmico para a idade de 91 dias, ou seja, após dois ciclos completos, mostraram uma diferença significativa entre o valor do módulo dinâmico medido nas argamassas cicladas e nas argamassas não cicladas (Figura 4.45, Figura 4.47, Figura 4.49 e Figura 4.51), coincidente com o aumento de resistência mecânica ocorrido para as argamassas cicladas neste período.

A velocidade de passagem das ondas do ultra-som foi menor nos corpos de prova não ciclados, por isso o módulo dinâmico foi maior nos corpos-de-prova ciclados. No entanto, como pode ver visto através da Figura 5.12, esta alteração não pôde ser sentida através da variação da densidade ao longo do tempo, sendo sensível apenas pela análise da curva termogravimétrica, que mostrou o aumento de massa acontecido dos 63 para os 175 dias de idade, na faixa de carbonatos (Figura 4.32).

Pode-se concluir que o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico foi mais sensível que o ensaio de módulo de elasticidade estático para registrar modificações ocorridas na microestrutura das argamassas.

Isto ressalta ainda mais importância do uso deste ensaio como parâmetro nos estudos de argamassas produzidas com agregado reciclado, não só por ser um ensaio não-destrutivo, mas também pelas vantagens apresentadas quanto ao procedimento, operação e o tempo de realização, além da boa correlação com o ensaio de resistência à compressão simples, como comentado em 4.3.8.

Figura 5.8 – Variação percentual do módulo de elasticidade estático com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade.

Figura 5.9 – Variação percentual do módulo de elasticidade dinâmico com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade.

Figura 5.10 – Variação do módulo de elasticidade estático com relação à respectiva argamassa de A1 em cada grupo e idade.

Figura 5.11 – Variação do módulo de elasticidade dinâmico com relação à respectiva argamassa de A1 em cada grupo e idade.

Figura 5.12 – Variação da densidade das argamassas com relação com relação à respectiva argamassa aos 63 dias de idade.

5.3 Interpretação do comportamento das argamassas não cicladas frente às cicladas

5.3.1 Com relação às propriedades físicas e mecânicas

Mesmo sofrendo queda nos valores de resistência à compressão simples de 91 para 175 dias de idade, os valores encontrados para os corpos-de-prova submetidos aos ciclos de umedecimento e secagem dos 63 aos 175 dias foram maiores do que os dos corpos-de-prova que permaneceram na câmara seca durante o mesmo período (Figura 5.6 e Figura 5.7).

As argamassas não cicladas produzidas com agregados reciclados se destacam com relação à perda de resistência à compressão simples aos 175 dias de idade, principalmente nos grupos G6 e G9.

Com relação à resistência à tração na flexão, as argamassas não cicladas produzidas com agregados reciclados se destacam com relação à perda de resistência a 175 dias de idade.

As argamassas não cicladas e mantidas na câmara seca apresentaram menor módulo de elasticidade, seja dinâmico ou estático, em 67 de um total de 80 resultados comparativos realizados e que estão mostrados nas Figura 4.44 até a Figura 4.51.

As argamassas não cicladas produzidas com areia normal T10, T15 e T20 tiveram aumento no módulo de elasticidade de 63 para 91 dias. De 63 para 175 dias, houve pequena variação na resistência à compressão simples e maior perda de resistência à tração na flexão, evidenciando alterações também na microestrutura das pastas de cimento, isentas de outras fontes de aluminatos ou sulfatos.

No que diz respeito à estabilidade dimensional e comparando-se a Figura 4.52 e Figura 4.53 verifica-se que também as argamassas não cicladas e mantidas em câmara seca apresentaram diversas idades de medida com tendência à expansão, inclusive as argamassas de AN (pico nítido em G6, G9 e G12 acerca de 160 dias). Nas argamassas de agregados reciclados as tendências à expansão aconteceram a partir de idades em torno de 84 dias. Mas, tanto nos grupos ciclados, quanto nos mantidos em câmara seca, não foi possível interpretar o efeito da contaminação do

gesso de construção dos agregados reciclados quanto à variação dimensional das argamassas.

5.3.2 Com relação às propriedades químicas

Os teores de sulfatos solúveis das argamassas não cicladas mostraram-se próximos aos obtidos para as argamassas cicladas e, portanto, ambas as condições desencadearam alterações na sua microestrutura aos 175 dias de idade.

Quanto às curvas TG e (Figura 7.22 até a Figura 7.41), cabe salientar que:

- A perda de massa na faixa até 80 °C não é significativa (Figura 4.28), mostrando que aos 63 dias de idade a secagem das argamassas tinha sido efetiva e que estas argamassas estavam, portanto, estabilizadas quanto ao teor de água livre em macroporos;
- Aos 175 dias, na faixa entre 80 °C e 125 °C (Figura 4.29), a perda de massa nas argamassas cicladas foi ligeiramente maior do que nas argamassas não cicladas, em 18 das 20 argamassas do estudo. Estes resultados estão coerentes com os ensaios mecânicos, que apontaram uma queda sensível de resistência nas argamassas não cicladas, o que possivelmente ocorreu por uma retração lenta adicional causada por perda de água adsorvida nos poros menores das argamassas. Também aqui é possível presumir efeitos da umidade de equilíbrio e cristalização dos sais presentes nesses poros, como e isto será melhor discutido no item 5.4;
- Aos 175 dias, entre 125 °C e 180 °C (Figura 4.30), a perda de massa nas argamassas cicladas foi maior do que nas argamassas não cicladas para os grupos G6 e G9, menor para o grupo G12 e sem tendência para o grupo G12F;
- Para o grupo G6, entre 400 °C e 550 °C (Figura 4.31), houve aumento na perda de massa, de 63 para 175 dias. Também se percebe que as argamassas cicladas tiveram perda de massa maior do que às não cicladas;

- Entre 80 °C e 1000 °C houve aumento da perda de massa total para todas as argamassas cicladas em relação as não cicladas, como seria esperado pelas condições de exposição aplicadas;
- Em todas as argamassas com agregado reciclado, na faixa entre 80 °C e 125 °C, a intensidade do pico diminuiu com a idade, sendo bem menor aos 175 dias do que era aos 63 dias.

5.4 Análise conjunta das prováveis alterações na microestrutura das argamassas

A permanência das argamassas em câmara seca, dos 7 aos 175 dias de idade, promoveu uma redução dos valores de resistência mecânica das argamassas bem mais prejudicial do que os ciclos de umedecimento e secagem aplicados.

Isto não foi previsto inicialmente e não convém comparar os resultados das argamassas cicladas e não cicladas aos 175 dias, pois pode-se estar falando de dois mecanismos de carbonatação e retração diferentes que geraram comportamentos parecidos quanto aos sulfatos solúveis na última idade.

Provavelmente a perda de resistência das argamassas em câmara seca se deveu à perda lenta e gradual da água dos mesoporos e microporos, o que pode também ter desestabilizado o equilíbrio dos compostos e sais existentes nessas faixas de porosidade. Tal comportamento pode ser, em princípio, atribuído ao elevado teor de finos em todos os grupos estudados.

Como as argamassas mantidas na câmara seca só foram ensaiadas aos 63 e 175 dias, o desenvolvimento de um programa experimental que acompanhasse essas argamassas ao longo das outras idades e que avaliasse melhor a sua microestrutura seria interessante para que maiores conclusões sobre os fenômenos envolvidos na secagem.

Analisando os sulfatos solúveis ao longo da ciclagem, percebe-se que de 63 para 175 dias houve um aumento de sulfatos solúveis nas argamassas com agregados reciclados contaminados em todos os grupos.

Esse aumento foi mais expressivo em G6 e G9 (maiores consumos de cimento) e bem menos perceptível em G12 e G12F, com menores consumos de cimento, mas em presença da cal. Isto evidencia que a cal pode ter fornecido íons cálcio em quantidade suficiente para que a formação de etringita pudesse ocorrer de uma maneira mais intensa, fixando mais íons sulfato. Antunes (1999), com base na bibliografia especializada, ressalta que a presença de cal hidratada altera a cinética da hidratação do gesso, mas o efeito das espécies químicas OH^- e Ca^+ é, no entanto, complexo.

A adição de cal também influenciou a resistência mecânica, minimizando o efeito negativo do alto teor de agregado reciclado e baixo teor de cimento nos grupos G12 e G12F.

Nas argamassas com o agregado de areia normal brasileira (AN) e com o agregado reciclado não contaminado (A1), o teor de sulfatos solúveis permaneceu praticamente inalterado em todas as idades e em todos os grupos.

Também notou-se que as argamassas com A1 apresentaram teor de SO_4 solúveis bem menores do que as argamassas com A2, A3 e A4 em cada grupo e este é o único fator que as diferencia, já que possuem mesmo traço, teor e tipo de cimento, entre outras variáveis. Este resultado é ainda coerente com a dosagem de sulfatos solúveis feita para os agregados pelos dois métodos usados neste trabalho (Figura 4.10 e Tabela 4.8).

A composição diferenciada do agregado de referência A1 também pode ser comprovada pela análise da sua curva DTG, pois esta não apresenta um pico na faixa entre 125 °C e 180 °C que existe nas curvas DTG dos agregados A2, A3 e A4 e que foi atribuída ao revestimento de gesso, como discutido em 4.1.2.

Isto poderia levantar a hipótese de que o aumento de sulfatos solúveis fosse proveniente da solubilização do revestimento de gesso com o início da ciclagem. Porém, ao analisar os sulfatos solúveis das argamassas não cicladas aos 175 dias, principalmente para o G9, percebe-se valores de teor de sulfatos solúveis próximos aos das argamassas cicladas. Como em ambas as condições houve forte carbonatação das argamassas, isto poderia gerar a liberação de sulfatos segundo Kuzel (1997).

Analisando as curvas TG e DTG das argamassas (Figura 7.22 a Figura 7.41), para interpretar o aumento de sulfatos solúveis de 63 pra 175 dias percebe-se que para todas as argamassas, o pico de 80 °C a 125 °C vai diminuindo de intensidade da menor para a maior idade, mostrando que existe menor teor do composto característico desta faixa ao longo do tempo. Isto se confirma pelas curvas TG interpretadas na Figura 4.29. Esse composto em redução poderia ser água adsorvida no gel de C-S-H, gipsita³², etringita ou monossulfoaluminato.

Com relação à água adsorvida no C-S-H, entende-se que esta apenas poderia ser reduzida pela permanência em câmara seca, mas não pela ciclagem, como ocorreu de forma generalizada para esta condição de exposição (Figura 4.29).

Se for considerada que é baixa a solubilidade da gipsita proveniente do revestimento de gesso, a ciclagem poderia solubilizar mais sulfato. Já para as argamassas não cicladas esta solubilização seria difícil de ocorrer e aqui se entende que apenas a formação de hemicarbonato poderia justificar o aumento de sulfato solúvel, segundo Kuzel (Figura 2.6).

A diminuição do pico na faixa de 80 °C a 125 °C pode ainda significar menos etringita ao longo do tempo, em função da sua transformação lenta em monossulfoaluminato, o que pode acontecer, segundo Kuzel (1996), na presença inicial de CO₂. Também pode reforçar esta hipótese o fato do monossulfoaluminato ser estável apenas na ausência de CO₂.

De forma coerente com esta suposição está ainda o fato de que enquanto não houve aumento de massa das argamassas entre 63 e 91 dias, conforme a análise pela curva TG entre 80 °C e 1000 °C (Figura 4.34), a sua resistência mecânica evoluiu para as três propriedades analisadas (resistência à tração na flexão, resistência à compressão simples e módulo de elasticidade).

Se for considerada a carbonatação ocorrida após o início da ciclagem, comprovada pela análise da TG na faixa entre 550 °C e 1000 °C e levando-se em conta a teoria de Kuzel (1996), também aceita por Taylor (1997), pode-se supor que parte do

---

³² Cabe comentar que a diferenciação da gipsita usada na contaminação dos agregados apareceu efetivamente para uma faixa de temperatura um pouco maior, de 125 °C a 180 °C.

monossulfato se transformou em etringita e hemicarbonato, o que seria compatível com a carbonatação progressiva sofrida pelas argamassas dos 63 até os 175 dias de idade e a perda de resistência mecânica.

Ainda segundo Kuzel (1996), em uma argamassa ou concreto onde o monossulfoaluminato está presente, a formação de etringita tardia é a primeira etapa da carbonatação. Em uma segunda etapa, o CO_3 reage com o íon Ca^{+2} para formar CaCO_3 , e as fases AFm, etringita e C-S-H são descalcificadas com a queda final do pH para a faixa de 8,5 ou menos.

Melhores conclusões acerca dos mecanismos aqui desenvolvidos precisariam estar embasadas pelas diferenças entre o teor de sulfatos totais e solúveis nas argamassas e isto terá que ser confirmado por uma análise química quantitativa de anidrido sulfúrico, já que a FRX não retornou em resultados plenamente confiáveis.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões do programa experimental

A análise das propriedades mecânicas e químicas das argamassas estudadas neste trabalho mostra resultados coerentes com interpretações e teorias recentes sobre o efeito de sulfatos solúveis em materiais cimentícios (Kuzel, 1996; Taylor, 1997) e inclusive no que diz respeito ao seu efeito em agregados reciclados (Collepari, 2003). A seguir salientam-se as conclusões principais.

6.1.1 Quanto à contaminação por sulfatos nos agregados reciclados

Apenas a presença do revestimento de gesso em A2, A3 e A4 aumentou quase 3 vezes o teor de sulfatos solúveis nos agregados reciclados e em quase 2 vezes o teor de sais solúveis totais nesses agregados.

A presença de sulfato de cálcio em excesso no agregado reciclado produziu alterações no desempenho das argamassas e afetou as suas propriedades mecânicas.

Assim, no caso dos agregados estudados, com o uso destinado para argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, considera-se recomendável adotar os limites preconizados pelo IGS (Tabela 2.2). Também o limite da norma alemã na Tabela 2.3 pode ser sugerido, 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 como discutido no Capítulo 3.

6.1.2 Quanto aos efeitos principais dos ciclos de umedecimento e secagem

A ciclagem teve um efeito muito expressivo nas argamassas, principalmente durante a aplicação dos primeiros ciclos, desencadeando um processo de carbonatação que alterou visivelmente as suas propriedades mecânicas, promovendo um aumento sensível de resistência de 63 para 91 dias de idade. Os ensaios de termogravimetria

(Figura 4.32 e Figura 4.33) comprovaram a ocorrência da carbonatação das argamassas.

Essa carbonatação provavelmente foi favorecida pelas argamassas permanecerem por 7 dias em estufa ventilada, após cada ciclo de umedecimento, por 7 dias em câmara úmida.

Também se pode verificar a diferença dos valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico medido aos 91 dias entre as argamassas cicladas e não cicladas (Figura 4.45, Figura 4.47, Figura 4.49 e Figura 4.51).

Com isso pode-se concluir que, mesmo tendo-se adotado uma ciclagem não muito agressiva, mas próxima a condições climáticas brasileiras, seus efeitos puderam ser medidos em todas as argamassas, em ensaios de média duração.

Assim pode-se dizer que este tipo de ciclagem é compatível para ser usado em pesquisas com argamassas de agregados reciclados nacionais, inclusive naquelas que têm a contaminação por gesso de construção incluída como variável e como foi o caso deste trabalho. No entanto, há de se considerar a maior propensão à carbonatação, em função do uso da estufa ventilada durante a ciclagem.

6.1.3 Quanto às alterações nas propriedades químicas e microestrutura das argamassas

As argamassas produzidas com os agregados reciclados contaminados por gesso de construção (A2, A3 e A4) sofreram variação em seus teores de sulfatos solúveis com a aplicação da ciclagem (de 63 para 175 dias).

Para as argamassas com o agregado reciclado não contaminado pelo revestimento de gesso (A1), a aplicação dos ciclos praticamente não influenciou os teores de sulfatos solúveis (Figura 5.1), mostrando não ter sido significativa a contribuição da fração de origem cimentícia presente nos materiais de construção que lhe deram origem.

Em princípio, as alterações na sua microestrutura puderam ser avaliadas pela redução de resistência mecânica das argamassas (item 6.1.4) e ainda com base em análise termogravimétrica. Cabe agora o aprofundamento de resultados, por outras técnicas

que possam confirmar ou não os mecanismos de deterioração apontados como mais prováveis e localizados em artigos recentes de especialistas internacionais.

Por ora, ficou comprovado que mesmo a presença de baixos teores de gesso de construção, nos resíduos de construção e demolição usados para a produção de agregados reciclados, pode causar modificações nas propriedades químicas e mecânicas das argamassas com eles produzidas. Como o fenômeno ocorreu também para as argamassas mantidas em câmara seca, isto precisa ser melhor elucidado, e cabendo adiantar que também para essa condição de cura seria possível aplicar o conceito de mecanismo holístico de deterioração defendido por Collepardi (2003), para o caso de agregados reciclados.

Os ensaios de DRX e FRX não foram os mais adequados quanto à sensibilidade frente à determinação de sulfatos nas argamassas, em condições normais de preparação de amostras (moagem).

Analisando os resultados dos ensaios realizados pelo IPT (Figura 5.1e Figura 5.2) e que permitiram as melhores interpretações deste trabalho, percebe-se que é imprescindível incluir os ensaios de análise química quantitativa em estudos de deterioração de produtos cimentícios com agregados reciclados. Apenas a análise de propriedades físicas e mecânicas, mesmo que apoiada em ensaios diversos de microestrutura (DRX, DTG, DTA, MEV e porosimetria), podem não permitir avaliar os critérios mais importantes em estudos envolvendo a formação de etringita e sais relacionados. Vários autores apontam dificuldades na detecção desses sais, por sua sensibilidade à moagem, aquecimento ou vácuo.

6.1.4 Quanto aos ensaios de resistência mecânica

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 (Figura 5.4).

Como melhor comportamento quanto a esta propriedade apenas se destacaram as argamassas T5 e T10, com o agregado AN. Entre as argamassas com agregado reciclado, a condição de permanência em câmara seca mostrou-se ainda mais agressiva do que a condição de aplicação de ciclos de umedecimento e secagem.

O grupo G9 foi o que apresentou os menores valores de resistência à compressão simples ao longo das idades. Esse grupo é o que tem o maior teor de agregado, considerando apenas a argamassa feita com cimento, sem a adição de cal.

Para os grupos G12 e G12F, mesmo com um maior teor de agregado e menor teor de cimento, a adição de cal foi significativa para aumentar os valores de resistência à compressão simples ao longo das idades.

O ensaio de módulo de elasticidade estático mostrou-se complexo com relação à operação, em função dos extensômetros serem muito sensíveis e qualquer alteração na colocação dos mesmos ser capaz de provocar resultados com muita diferença de valor entre si, ou mesmo de anular o ensaio realizado.

Por sua vez, o módulo de elasticidade dinâmico, determinado através do ultra-som mostrou-se de fácil operação, com a vantagem de ser bem mais rápido, não destrutivo e apresentar valores mais homogêneos, com boa correlação com os ensaios de resistência à compressão simples, conforme Anexo 7.9.

Entretanto, os métodos disponíveis dizem respeito ao ensaio para concreto, sendo necessário aprofundar os estudos com relação à aplicação para argamassas, adequando os métodos e os fatores considerados no cálculo, conforme a equação no item 3.9.6.

6.1.5 Quanto à estabilidade dimensional

As argamassas, em corpos-de-prova de 4,0 cm x 4,0 cm x 16,0 cm, apresentaram um comportamento de variação dimensional heterogêneo e sem tendência de expansão ou retração, tendo ora um comportamento ora outro, sem que pudesse se estabelecer uma lógica nestes resultados, em relação às condições de exposição das barras (câmara seca, câmara úmida ou estufa ventilada).

Um acompanhamento mais detalhado das argamassas a partir da desforma está sendo feito por Shiroma (2004), utilizando as mesmas proporções em massa e agregados deste estudo, esperando-se avaliar se este problema se deveu ao método de ensaio em si (tamanho das barras ou suporte de medição) ou ao comportamento intrínseco das argamassas.

Cabe salientar que um comportamento errático dimensional pode ser plausível com o mecanismo holístico de deterioração por etringita tardia, explicado por Collepardi (2003), inclusive para o caso de agregados reciclados contaminados.

6.1.6 Quanto à influência do tipo de cimento

Não foram medidas diferenças significativas na resistência mecânica das argamassas, em função da adição de cimento CP III 32 RS ou CP II F 32, com menor e maior teor de C_3A .

De maneira geral, esses cimentos não afetaram o comportamento das argamassas com relação às alterações no teor de sulfatos solúveis e totais, pelo menos nos níveis de consumo aqui testados (100 kg/m^3 até 200 kg/m^3).

6.1.7 Quanto à adição de cal nas argamassas com agregado reciclado

O uso da cal foi vantajoso e é tecnicamente recomendado.

Nos grupos que utilizaram a cal na produção de argamassas com agregados reciclados (mesmo tendo esses grupos o menor teor de cimento e o maior teor de agregados reciclado), os valores de resistência mecânica foram bem próximos aos valores encontrados para o grupo de argamassa com maior teor de cimento e menor teor de agregados reciclados e que não usaram a cal na produção das argamassas.

Nos ensaios acelerados pela ciclagem até 175 dias, as argamassas com os 4 agregados reciclados e cimento, sem a adição de cal (G6, G9), apresentaram teores de sulfatos solúveis crescentes e que podem ser enquadrados como sendo de risco potencial médio, para a durabilidade de alvenarias expostas à umidade, pelos critérios do IGS, citados na Tabela 2.2.

Apenas nas argamassas com o uso de cal hidratada e com agregados reciclados não contaminados por gesso de revestimento (T11 e T16) observou-se uma tendência à estabilização do teor de sulfatos (Figura 5.1).

Assim, 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.

Isto foi inclusive confirmado pelo melhor comportamento quanto à susceptibilidade à formação de eflorescência apresentado pelas argamassas com os agregados A1 e A2, embora não tenha sido suficiente minimizar a formação de eflorescência nas argamassas com os agregados A3 e A4 (Tabela 4.14).

6.1.8 Quanto às proporções em massa e consumo de cimento das argamassas

Com relação às proporções em massa escolhidas para a produção das argamassas, pode-se perceber que as argamassas do grupo G9 (cimento:agregado reciclado) apresentaram menores valores de resistência mecânica que os demais. Em princípio isto pode ser decorrente do menor consumo de cimento, ausência de cal hidratada e alto teor de agregado destas argamassas.

A cal mostrou-se um constituinte essencial, conforme já comentado no item 6.1.7 e seu uso se mostrou factível mesmo para baixos consumos de cimento.

6.2 Sugestões para estudos futuros

- Avaliação das alterações na microestrutura das argamassas estudadas neste trabalho por outras técnicas complementares como, por exemplo, análise térmica diferencial, microscopia eletrônica de varredura, difratometria de Raios-X e porosimetria, com vistas à identificação dos compostos de sulfatos gerados pela contaminação dos agregados reciclados com revestimentos de gesso;
- Aprofundar o estudo da carbonatação de argamassas produzidas com agregados reciclados contaminados por sulfatos provenientes do gesso de construção, em paralelo com outras análises de microestrutura;
- Influência do teor de finos (abaixo de 75 μm) nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas produzidas com agregado reciclado, buscando a definição de limites normativos específicos para este agregado nas suas aplicações, em argamassas de assentamento de alvenarias não estruturais. Em especial procurar avaliar a parcela de contribuição dos agregados reciclados e do seu elevado teor de finos na evolução da hidratação do cimento, da carbonatação e seus efeitos na retração por secagem e perda da resistência à tração das argamassas;
- Estudo do desempenho de argamassas simples de cal com os agregados reciclados da região de Socorro (SP);
- Acompanhamento das modificações na porosidade das argamassas produzidas com agregados reciclados contaminados por sulfatos provenientes do gesso de construção, frente a várias condições de cura e de ciclagem. Influência das diferenças climáticas regionais no comportamento de argamassas produzidas com agregado reciclado, principalmente no que diz respeito a umidades relativas baixas por longo período de tempo;
- Avaliação dos testes rápidos do teor de sulfatos solúveis em argamassas e agregados reciclados com pH mais elevado, conforme item 3.3.3.3, pela metodologia desenvolvida em cooperação com o IGS da Alemanha;

- Avaliar padrões para análises de FRX para a determinação de SO_3 em agregados reciclados;
- Adequação final da aplicação de ultra-som para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico em argamassas como substituição ao módulo de elasticidade estático, considerando as excelentes correlações obtidas com a resistência à compressão das argamassas.

7 ANEXOS

7.1 Relações de volume e massa nas paredes geradoras dos agregados

Pórtico 1 – Valores teóricos estimados					
Componentes	Densidade kg/m ³	Volume		Massa	
		m ³	%	kg	%
Concreto	2.300	0,248	38%	570,4	47%
Alvenaria tij maciço	1.360	0,270	41%	366,6	30%
Arg assentamento	1.900	0,082	12%	156,6	13%
Emboço	1.900	0,060	9%	114,0	9%
Rev. de gesso	900	0,000	0%	0,0	0%
Total	-	0,660	100%	1207,6	100%
				SO₄	0,0
				SO₃	0,0
Pórtico 2 - Valores teóricos estimados					
Componentes	Densidade kg/m ³	Volume		Massa	
		m ³	%	kg	%
Concreto	2.300	0,248	36%	570,4	46%
Alvenaria tij maciço	1.360	0,270	39%	366,6	30%
Arg assentamento	1.900	0,082	12%	156,6	13%
Emboço	1.900	0,060	9%	114,0	9%
Rev. de gesso	900	0,030	4%	27,0	2%
Total	-	0,690	100%	1234,6	100%
				SO₄	15,1
				SO₃	12,6
Pórtico 3 - Valores teóricos estimados					
Componentes	Densidade kg/m ³	Volume		Massa	
		m ³	%	kg	%
Concreto	2300	0,248	34%	570,4	45%
Alvenaria tij maciço	1360	0,270	37%	366,6	29%
Arg assentamento	1900	0,082	11%	156,6	12%
Emboço	1900	0,060	8%	114,0	9%
Rev. de gesso	900	0,060	8%	54,0	4%
Total	-	0,720	100%	1261,6	100%
				SO₄	30,1
				SO₃	25,1
Pórtico 4 - Valores teóricos finais estimados					
Componentes	Densidade kg/m ³	Volume		Massa	
		m ³	%	kg	%
Concreto	2300	0,248	33%	570,4	44%
Alvenaria tij maciço	1360	0,270	36%	366,6	28%
Arg assentamento	1900	0,082	11%	156,6	12%
Emboço	1900	0,060	8%	114,0	9%
Rev. de gesso	900	0,090	12%	81,0	6%
Total	-	0,750	100%	1288,6	100%

SO₄	45,2	3,5%
SO₃	37,7	3%

7.2 Caracterização do gesso de construção aplicado como revestimento nos pórticos usados na produção dos agregados reciclados

Figura 7.1 – Gesso de construção utilizado como revestimento das paredes.

Tabela 7.1 – Análise química quantitativa por FRX. (% de massa)

Material	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
Gesso de construção	0,37	0,26	<0,10	<0,10	<0,10	29,7	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	52,5	14,1

Figura 7.2 – Curvas TG e DTG do gesso de construção usado nos pórticos geradores de A2, A3 e A4.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra							
Histórico: Certificado: 054/04	Run Number: 14	Medida:					
Arquivo: 054	Record Number: 18	Análise: Thu Feb 5 2004 2:54PM					
Sample Path: C:\SIZER\DATA\2004\	Fonte de Resultados: Média						
Notas: AMOSTRA: Gesso Cerusa							
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA SELMO							
Meio de Dispersão: álcool isopropílico							
Vel. bomba: 2500 rpm		ultrasonic: 2 min.					
Detalhes do Sistema							
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 18.5 %				
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.388 %				
Analysis Model: Polydisperse							
Modifications: None							
Resultados Estatísticos							
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração= 0.0183 %Vol	Densidade= 2.850 g / cub. cm	Área Superf. Espec.= 0.3382 sq. m / g				
Dímetro Médios:	D [v, 0.1] = 2.83 um	D [v, 0.5] = 18.82 um	D [v, 0.9] = 112.71 um				
D [H, 3] = 40.69 um	D [3, 2] = 8.89 um	Span = 6.545E+00	Uniformidade = 2.018E+00				
Dím. Inferior (um)	No. Intervalo %	Dím. Superior (um)	Acum. Abaixo %	Dím. Inferior (um)	No. Intervalo %	Dím. Superior (um)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.08	0.00	8.83	3.47	7.72	31.81
0.08	0.00	0.07	0.00	7.72	3.52	9.00	35.13
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	3.55	10.48	38.88
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	3.80	12.21	42.28
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	3.85	14.22	45.93
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	3.71	16.57	49.84
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	3.78	19.31	53.30
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	3.78	22.49	57.18
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	3.78	28.20	60.95
0.20	0.01	0.23	0.01	28.20	3.73	30.53	64.88
0.23	0.01	0.27	0.03	30.53	3.85	35.58	68.33
0.27	0.02	0.31	0.05	35.58	3.54	41.43	71.87
0.31	0.04	0.38	0.09	41.43	3.40	48.27	75.27
0.38	0.08	0.42	0.15	48.27	3.22	58.23	78.50
0.42	0.08	0.49	0.23	58.23	3.00	65.51	81.49
0.49	0.13	0.58	0.38	65.51	2.74	78.32	84.23
0.58	0.18	0.67	0.54	78.32	2.48	88.91	88.69
0.67	0.28	0.78	0.79	88.91	2.20	103.58	88.80
0.78	0.40	0.91	1.19	103.58	1.97	120.87	90.86
0.91	0.55	1.08	1.75	120.87	1.79	140.58	92.85
1.08	0.74	1.24	2.49	140.58	1.88	163.77	94.31
1.24	0.97	1.44	3.48	163.77	1.55	190.80	95.88
1.44	1.22	1.88	4.68	190.80	1.40	222.28	97.28
1.88	1.50	1.95	6.18	222.28	1.18	258.95	98.44
1.95	1.81	2.28	7.99	258.95	0.87	301.88	99.31
2.28	2.13	2.85	10.12	301.88	0.51	351.48	99.82
2.85	2.44	3.09	12.58	351.48	0.17	409.45	99.99
3.09	2.72	3.80	15.28	409.45	0.01	477.01	100.00
3.80	2.97	4.19	18.25	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	3.17	4.88	21.41	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	3.31	5.89	24.72	647.41	0.00	754.23	100.00
5.89	3.41	8.83	28.14	754.23	0.00	878.87	100.00

Figura 7.3 – Granulometria a laser – Gesso de construção usado nos pórticos geradores de A2, A3 e A4.

7.3 Resultados da granulometria a laser dos aglomerantes e agregados

Figura 7.4 – Granulometria a laser – Cimento CP III 32 RS.

**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**

Laboratório de Caracterização Tecnológica – LCT

Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-900 São Paulo - SP e-mail: lct@poli.usp.br
TEL: (0XX11) 3091-5151, 3091-5551 e 3091-5787 FAX (0XX11) 3815-5785

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Histórico: Certificado: 055/04		Detalhes da Amostra	Medida:
Arquivo: 055		Run Number: 15	Análise: Thu Feb 5 2004 3:14PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\2004\		Record Number: 25	Fonte de Resultados: Média
Notas: AMOSTRA: CP II F32 Gerusa			
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA SELMO			
Meio de Dispersão: álcool isopropílico			
Vel. bomba: 2500 rpm		ultrassom: 1 min.	

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 14.8 %
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.755 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração= 0.0118 %Vol	Densidade= 2.650 g / cub. cm	Área Superf. Espec.= 0.6194 sq. m / g
Diâmetros Médios:	D (v, 0.1) = 3.19 um	D (v, 0.5) = 14.37 um	D (v, 0.9) = 45.94 um
D [4, 3] = 20.20 um	D [3, 2] = 3.66 um	Span = 2.976E+00	Uniformidade = 9.317E-01

Diâm. Inferior (um)	No Intervalo %	Diâm. Superior (um)	Acum. Abaixo %	Diâm. Inferior (um)	No Intervalo %	Diâm. Superior (um)	Acum. Abaixo %
0.05	0.01	0.06	0.01	6.63	4.57	7.72	29.44
0.06	0.03	0.07	0.04	7.72	4.86	9.00	34.30
0.07	0.05	0.08	0.09	9.00	5.03	10.48	39.33
0.08	0.07	0.09	0.16	10.48	5.13	12.21	44.46
0.09	0.10	0.11	0.26	12.21	5.20	14.22	49.66
0.11	0.13	0.13	0.39	14.22	5.27	16.57	54.94
0.13	0.16	0.15	0.56	16.57	5.37	19.31	60.31
0.15	0.20	0.17	0.76	19.31	5.48	22.49	65.79
0.17	0.24	0.20	1.00	22.49	5.59	26.20	71.38
0.20	0.29	0.23	1.29	26.20	5.58	30.53	76.96
0.23	0.33	0.27	1.62	30.53	5.33	35.56	82.29
0.27	0.36	0.31	1.97	35.56	4.83	41.43	87.12
0.31	0.37	0.36	2.34	41.43	4.13	48.27	91.25
0.36	0.36	0.42	2.70	48.27	3.32	56.23	94.57
0.42	0.37	0.49	3.07	56.23	2.49	65.51	97.06
0.49	0.36	0.58	3.44	65.51	1.69	76.32	98.75
0.58	0.35	0.67	3.78	76.32	0.94	88.91	99.69
0.67	0.33	0.78	4.12	88.91	0.21	103.58	99.90
0.78	0.31	0.91	4.42	103.58	0.06	120.67	99.96
0.91	0.25	1.06	4.67	120.67	0.02	140.58	99.98
1.06	0.38	1.24	5.04	140.58	0.01	163.77	99.99
1.24	0.39	1.44	5.43	163.77	0.00	190.80	99.99
1.44	0.44	1.68	5.87	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.56	1.95	6.43	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.75	2.28	7.18	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	1.03	2.65	8.21	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	1.42	3.09	9.63	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	1.90	3.60	11.53	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	2.46	4.19	13.99	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	3.06	4.88	17.05	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	3.65	5.69	20.70	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	4.17	6.63	24.87	754.23	0.00	878.67	100.00

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK

Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
Serial Number: 33544-299

18 Feb 04

Prof. Dr. Henrique Kahn
Coordenador do LCT-EPUSP

Dra. M. Manuela M. Lé Tassinari
Pacientadora do LCT-EPUSP

Figura 7.5 – Granulometria a laser – Cimento CP II F 32.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra			
Histórico: Certificado: 052/04	Run Number: 13	Medida:	
Arquivo: 052	Record Number: 30	Análise: Thu Feb 5 2004 2:33PM	
Sample Path: C:\SIZER\DATA\2004\		Fonte de Resultados: Média	
Notes: AMOSTRA: Cal CH III Genusa			
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA BELMO			
Meio de Dispersão: álcool isopropílico			
Vel. bomba: 2500 rpm	ultraison: 2 min.		

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 13.6 %
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000);	Dispersion R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydispense			Residual: 0.867 %
Modifications: None			

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração= 0.0086 %Vol	Densidade= 2.650 g / cub. cm	Area Superf. Espec.= 0.7288 sq. m / g
Diâmetros Médios:	D [v, 0.1] = 1.61 µm	D [v, 0.5] = 8.48 µm	D [v, 0.9] = 30.99 µm
D [p, 3] = 14.74 µm	D [3, 2] = 3.12 µm	Span = 5.820E+00	Uniformidade = 1.782E+00

Diâm. Inferior (µm)	No. Intervalo %	Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %	Diâm. Inferior (µm)	No. Intervalo %	Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	4.50	7.72	55.21
0.06	0.01	0.07	0.01	7.72	4.03	9.00	59.24
0.07	0.01	0.08	0.02	9.00	3.61	10.48	62.85
0.08	0.02	0.09	0.04	10.48	3.30	12.21	66.15
0.09	0.03	0.11	0.06	12.21	3.12	14.22	69.27
0.11	0.05	0.13	0.13	14.22	3.07	16.57	72.34
0.13	0.07	0.15	0.20	16.57	3.10	19.31	75.44
0.15	0.10	0.17	0.29	19.31	3.19	22.49	78.63
0.17	0.13	0.20	0.42	22.49	3.28	26.20	81.90
0.20	0.17	0.23	0.60	26.20	3.21	30.53	85.11
0.23	0.23	0.27	0.82	30.53	3.03	35.56	88.14
0.27	0.28	0.31	1.10	35.56	2.73	41.43	90.88
0.31	0.33	0.36	1.44	41.43	2.35	48.27	93.21
0.36	0.38	0.42	1.82	48.27	1.95	56.23	95.16
0.42	0.44	0.49	2.26	56.23	1.58	65.51	96.72
0.49	0.50	0.58	2.76	65.51	1.20	76.32	97.92
0.58	0.58	0.67	3.32	76.32	0.89	88.91	98.81
0.67	0.64	0.78	3.96	88.91	0.82	103.58	99.43
0.78	0.79	0.91	4.75	103.58	0.39	120.67	99.82
0.91	0.97	1.06	5.72	120.67	0.15	140.58	99.97
1.06	1.23	1.24	6.95	140.58	0.03	163.77	100.00
1.24	1.58	1.44	8.53	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	2.03	1.68	10.55	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	2.58	1.95	13.14	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	3.22	2.28	16.36	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	3.67	2.65	20.23	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	4.50	3.09	24.73	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	5.00	3.60	29.73	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	5.32	4.19	35.05	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	5.42	4.88	40.47	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	5.28	5.69	45.75	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	4.95	6.63	50.71	754.23	0.00	879.67	100.00

Figura 7.6 – Granulometria a laser – Cal hidratada CH III.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra			
Histórico: Certificado: 04804	Run Number: 18	Medida:	
Arquivo: 048	Record Number: 28	Análise: Fri Feb 13 2004 10:14AM	
Sample Path: C:\SIZER\DATA\2004\	Fonte de Resultados: Média		
Notas: AMOSTRA: A1 gerusa (com 72% em peso passando em 20µ)			
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA SELMO			
Meio de Dispersão: água deionizada		Dispersante: calgon	
Veloc. bomba: 70%		ultrassom: 1 min.	

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 18.3 %
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7200, 0.1000) ;	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 1.783 %
Analysis Model: Polydispense			
Modifications: Active --	Blended with Record: 27		

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração= 0.0833 %Vol	Densidade= 2.690 g / cub. cm	Área Superf. Espec.= 0.0560 sq. m / g
Díametros Médios:	D (v, 0.1) = 47.80 µm	D (v, 0.5) = 306.91 µm	D (v, 0.9) = 1128.29 µm
D [4, 3] = 510.20 µm	D [3, 2] = 40.48 µm	Span = 2.724E+00	Uniformidade = 8.174E-01

Díam Inferior (µm)	No Intervalo %	Díam Superior (µm)	Acum. Abaixo %	Díam Inferior (µm)	No Intervalo %	Díam Superior (µm)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.05	0.00	13.18	0.53	15.69	5.33
0.06	0.00	0.07	0.00	15.69	0.57	18.67	5.90
0.07	0.00	0.08	0.00	18.67	0.61	22.22	6.52
0.08	0.00	0.10	0.01	22.22	0.67	26.45	7.18
0.10	0.00	0.12	0.01	26.45	0.73	31.49	7.91
0.12	0.01	0.14	0.02	31.49	0.81	37.48	8.72
0.14	0.01	0.17	0.02	37.48	0.90	44.61	9.62
0.17	0.01	0.20	0.03	44.61	0.99	53.10	10.61
0.20	0.01	0.24	0.04	53.10	1.10	63.20	11.71
0.24	0.02	0.29	0.06	63.20	1.20	75.23	12.91
0.29	0.02	0.34	0.08	75.23	1.34	89.55	14.25
0.34	0.02	0.40	0.10	89.55	1.55	108.59	15.80
0.40	0.02	0.48	0.12	108.59	1.90	128.87	17.71
0.48	0.03	0.57	0.15	128.87	2.48	151.01	20.17
0.57	0.04	0.68	0.19	151.01	3.25	179.75	23.42
0.68	0.05	0.81	0.25	179.75	4.23	213.06	27.65
0.81	0.07	0.97	0.32	213.06	5.27	254.66	32.92
0.97	0.09	1.15	0.41	254.66	6.23	303.12	39.15
1.15	0.12	1.37	0.53	303.12	6.95	360.81	46.10
1.37	0.14	1.63	0.67	360.81	7.37	429.48	53.47
1.63	0.17	1.94	0.84	429.48	7.45	511.19	60.93
1.94	0.20	2.31	1.04	511.19	7.33	608.46	68.26
2.31	0.23	2.75	1.28	608.46	7.02	724.24	75.28
2.75	0.27	3.27	1.55	724.24	6.45	862.06	81.73
3.27	0.30	3.89	1.85	862.06	5.65	1026.10	87.38
3.89	0.34	4.63	2.19	1026.10	4.65	1221.35	92.04
4.63	0.37	5.52	2.56	1221.35	3.50	1453.77	95.53
5.52	0.40	6.57	2.95	1453.77	2.52	1730.41	98.15
6.57	0.42	7.81	3.37	1730.41	1.38	2069.69	99.53
7.81	0.45	9.30	3.82	2069.69	0.45	2451.63	99.98
9.30	0.47	11.07	4.29	2451.63	0.02	2918.16	100.00
11.07	0.50	13.18	4.79	2918.16	0.00	3473.45	100.00

Figura 7.7 – Granulometria a laser em água – A1.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra			
Histórico: Certificado: 048/04	Run Number: 16	Medida:	
Arquivo: 048	Record Number: 47	Análise: Wed Jul 26 2004 1:57PM	
Sample Path: C:\MSZERS\DATA\2004\		Fonte de Resultados: Média	
Notas: AMOSTRA: A1 gerada (com 72% em peso passando em 200)			
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA BELMO			
Meio de Dispersão: Alcohol Isopropílico			
Veloc. bomba: 2500 rpm			

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 18.2 %
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000):	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydispense			Residual: 0.437 %
Modifications: None			

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração: 0.0477 %/vol	Densidade: 2.430 g / cub. cm	Area Superf. Espec. = 0.1289 sq. m / g
Diâmetros Médios:	D (v, 0.1) = 8.15 um	D (v, 0.5) = 84.34 um	D (v, 0.9) = 322.87 um
D [4, 3] = 135.11 um	D [3, 2] = 19.24 um	Span = 3.3378+00	Uniformidade = 1.0500+00

Dim. Inferior (um)	No Intervalo %	Dim. Superior (um)	Acum. Abaixo %	Dim. Inferior (um)	No Intervalo %	Dim. Superior (um)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.06	0.00	6.83	1.19	7.72	9.56
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	1.26	9.00	10.83
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	1.34	10.48	12.17
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	1.44	12.21	13.61
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	1.54	14.22	15.15
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	1.66	16.57	16.81
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	1.81	19.31	18.62
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	1.96	22.49	20.58
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	2.14	26.20	22.73
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	2.34	30.53	25.07
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	2.56	35.56	27.62
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	2.79	41.43	30.42
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	3.04	48.27	33.46
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	3.30	56.25	36.76
0.42	0.04	0.49	0.04	56.23	3.58	65.51	40.34
0.49	0.04	0.58	0.08	65.51	3.85	76.32	44.19
0.58	0.05	0.67	0.13	76.32	4.13	88.91	48.32
0.67	0.07	0.78	0.20	88.91	4.41	103.58	52.73
0.78	0.11	0.91	0.31	103.58	4.68	120.67	57.41
0.91	0.16	1.06	0.47	120.67	4.94	140.58	62.35
1.06	0.21	1.24	0.69	140.58	5.18	163.77	67.53
1.24	0.28	1.44	0.97	163.77	5.35	190.80	72.88
1.44	0.35	1.68	1.32	190.80	5.36	222.28	78.23
1.68	0.43	1.95	1.75	222.28	5.16	258.95	83.39
1.95	0.52	2.28	2.27	258.95	4.71	301.68	88.10
2.28	0.61	2.65	2.88	301.68	4.03	351.46	92.14
2.65	0.70	3.09	3.58	351.46	3.16	409.45	95.32
3.09	0.79	3.60	4.38	409.45	2.28	477.01	97.60
3.60	0.88	4.19	5.26	477.01	1.40	555.71	99.00
4.19	0.98	4.88	6.22	555.71	0.67	647.41	99.68
4.88	1.04	5.69	7.26	647.41	0.26	754.23	99.94
5.69	1.12	6.83	8.38	754.23	0.06	878.67	100.00

Melvern Instruments Ltd.
 Melvern, UK
 Tel: +[44] (0)1634-892456 Fax: +[44] (0)1634-892769

Masterizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number: 33544-299

p. 16
 30 Jul 04 09:34

Figura 7.8 – Granulometria a laser em álcool– A1.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra		
Histórico: Certificado: 049/04	Run Number: 18	Medida:
Arquivo: 049	Record Number: 49	Análise: Fri Feb 13 2004 10:25AM
Sample Path: C:\SIZER\DATA\2004\		Fonte de Resultados: Média
Notas: AMOSTRA: A2 gerusa (com 66,4% em peso pesante em 20 μ)		
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA SELMO		
Meio de Dispersão: água deionizada Dispersante: calgon		
Veloc. bomba: 70% ultrassom: 1 min.		

Detalhes do Sistema		
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000)]:	Dispersion R.I. = 1.3300]
Analysis Model: Polydisperse		Obscuration: 21.0 %
Modifications: Active --	Blended with Record 32 ;	Residual: 1.726 %

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração: 0.1111 %Vol	Densidade: 2.650 g / cub. cma Superf. Espec: 0.0826 sq. m / g	
Díametros Médios:	D [x, 0.1] = 39.02 μ m	D [x, 0.5] = 335.09 μ m	D [x, 0.9] = 942.77 μ m
D [H, 3] = 432.09 μ m	D [3, 2] = 36.20 μ m	Span = 2.608E+00	Uniformidade = 8.155E-01

Díam. Inferior (μ m)	No. Intervalo %	Díam. Superior (μ m)	Acum. Abaixo %	Díam. Inferior (μ m)	No. Intervalo %	Díam. Superior (μ m)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.08	0.00	13.18	0.80	15.89	6.05
0.08	0.00	0.07	0.00	15.89	0.84	18.67	6.68
0.07	0.00	0.08	0.00	18.67	0.88	22.22	7.38
0.08	0.00	0.10	0.01	22.22	0.73	28.45	8.10
0.10	0.00	0.12	0.01	28.45	0.80	31.49	8.90
0.12	0.01	0.14	0.02	31.49	0.88	37.48	9.78
0.14	0.01	0.17	0.02	37.48	0.98	44.81	10.78
0.17	0.01	0.20	0.03	44.81	1.08	53.10	11.84
0.20	0.01	0.24	0.05	53.10	1.20	63.20	13.04
0.24	0.02	0.29	0.08	63.20	1.34	75.23	14.38
0.29	0.02	0.34	0.08	75.23	1.52	89.55	15.90
0.34	0.02	0.40	0.11	89.55	1.82	108.59	17.72
0.40	0.03	0.48	0.13	108.59	2.29	128.87	20.02
0.48	0.03	0.57	0.17	128.87	3.01	151.01	23.03
0.57	0.04	0.68	0.21	151.01	3.98	179.75	27.01
0.68	0.08	0.81	0.27	179.75	5.11	213.95	32.12
0.81	0.08	0.97	0.35	213.95	6.25	254.88	38.37
0.97	0.10	1.15	0.45	254.88	7.19	303.12	45.57
1.15	0.13	1.37	0.59	303.12	7.81	360.81	53.38
1.37	0.18	1.63	0.75	360.81	8.08	429.46	61.44
1.63	0.20	1.94	0.95	429.46	7.78	511.19	69.22
1.94	0.23	2.31	1.18	511.19	7.03	608.46	78.26
2.31	0.27	2.75	1.45	608.46	8.16	724.24	82.42
2.75	0.31	3.27	1.77	724.24	5.25	862.06	87.67
3.27	0.35	3.89	2.12	862.06	4.30	1028.10	91.97
3.89	0.39	4.63	2.50	1028.10	3.28	1221.38	95.25
4.63	0.42	5.52	2.92	1221.38	2.25	1453.77	97.49
5.52	0.45	6.57	3.37	1453.77	1.42	1730.41	98.91
6.57	0.48	7.81	3.85	1730.41	0.78	2059.69	99.67
7.81	0.50	9.30	4.38	2059.69	0.27	2451.63	99.95
9.30	0.53	11.07	4.89	2451.63	0.05	2918.16	100.00
11.07	0.56	13.18	5.45	2918.16	0.00	3473.45	100.00

Figura 7.9 – Granulometria a laser em água – A2.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra			
Histórico: Certificado: 04054	Run Number: 19	Medida:	
Arquivo: 040	Record Number: 04	Análise: Wed Jul 26 2004 2:12PM	
Sample Path: C:\SIZE\DATA\2004\		Fonte de Resultados: Média	
Notas: AMOSTRA: A2 gerada (com 66,4% em peso pesante em 200)			
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA SELMO			
Meio de Dispersão: álcool isopropílico			
Veloc. bomba: 2500 rpm			

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 18.2 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000)]	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.671 %
Analysis Model: Polydispers			
Modifications: None			

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração: 0.0444 %Vol	Densidade: 2.420 g / cub. cm	Area Superf. Espec. = 0.1302 sq. m / g
Diluição Média:	D (v, 0.1) = 5.03 um	D (v, 0.5) = 97.78 um	D (v, 0.9) = 354.13 um
D [4, 3] = 145.18 um	D [3, 2] = 19.04 um	Span = 3.540E+00	Uniformidade = 1.121E+00

Dim Inferior (um)	No Intervalo %	Dim Superior (um)	Acum. Absoluto %	Dim Inferior (um)	No Intervalo %	Dim Superior (um)	Acum. Absoluto %
0.05	0.00	0.06	0.00	6.83	1.24	7.72	9.86
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	1.33	9.00	10.99
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	1.42	10.46	12.41
0.08	0.00	0.09	0.00	10.46	1.52	12.21	13.93
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	1.62	14.22	15.55
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	1.75	16.57	17.30
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	1.89	19.31	19.18
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	2.04	22.49	21.22
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	2.21	26.20	23.43
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	2.39	30.53	25.83
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	2.58	35.56	28.41
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	2.78	41.43	31.19
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	2.96	48.27	34.15
0.36	0.02	0.42	0.02	48.27	3.13	56.23	37.28
0.42	0.04	0.49	0.06	56.23	3.30	65.51	40.58
0.49	0.04	0.56	0.10	65.51	3.45	76.32	44.04
0.56	0.05	0.67	0.16	76.32	3.62	88.91	47.65
0.67	0.07	0.78	0.23	88.91	3.80	103.58	51.45
0.78	0.11	0.91	0.34	103.58	4.03	120.67	55.48
0.91	0.15	1.06	0.49	120.67	4.29	140.58	59.78
1.06	0.21	1.24	0.70	140.58	4.59	163.77	64.37
1.24	0.27	1.44	0.97	163.77	4.92	190.80	69.29
1.44	0.34	1.68	1.31	190.80	5.21	222.28	74.49
1.68	0.42	1.95	1.73	222.28	5.35	258.58	79.84
1.95	0.51	2.28	2.23	258.58	5.21	301.68	85.05
2.28	0.60	2.65	2.83	301.68	4.74	351.46	89.79
2.65	0.69	3.09	3.53	351.46	3.96	409.45	93.74
3.09	0.79	3.60	4.32	409.45	2.97	477.01	96.71
3.60	0.89	4.19	5.21	477.01	1.91	555.71	98.63
4.19	0.98	4.86	6.19	555.71	0.98	647.41	99.61
4.86	1.07	5.69	7.26	647.41	0.34	754.23	99.95
5.69	1.15	6.63	8.42	754.23	0.05	878.67	100.00

Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, UK
 t: (01684) 892456 Fax: (01684) 892769

Masterizer S1 long bed Ver. 2.19
 Serial Number: 33544-289

p. 17
 20 Jul 04 09:34

Figura 7.10 – Granulometria a laser em álcool– A2.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra			
Histórico: Certificado: 050/04	Run Number: 18	Medida:	
Arquivo: 050	Record Number: 34	Análise: Fri Feb 13 2004 10:34AM	
Sample Path: C:\SIZER\DATA\2004\	Fonte de Resultados: Média		
Notas: AMOSTRA: A3 gerusa (com 65% em peso passante em 200)			
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA BELMO			
Meio de Dispersão: água deionizada		Dispersante: calgon	
Veloc. bomba: 70%		ultrassom: 1 min.	

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 18.4 %
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = 1.7290, 0.1000];	Dispersant R.I. = 1.3300	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 1.754 %
Modifications: Active –	Blended with Record 17 ;		

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração= 0.0798 %Vol	Densidade= 2.850 g / cub. cm	Area Superf. Espec.= 0.0861 sq. m / g
Díametro Médio:	D [x, 0.1] = 38.22 um	D [x, 0.5] = 358.12 um	D [x, 0.9] = 1139.03 um
D [H, 3] = 492.07 um	D [S, 2] = 34.24 um	Span = 3.078E+00	Uniformidade = 9.190E-01

Dím. Inferior (um)	No Intervalo %	Dím. Superior (um)	Acum. Absoluto %	Dím. Inferior (um)	No Intervalo %	Dím. Superior (um)	Acum. Absoluto %
0.05	0.00	0.06	0.00	13.18	0.80	15.69	5.97
0.06	0.00	0.07	0.00	15.69	0.65	18.67	6.62
0.07	0.00	0.08	0.01	18.67	0.71	22.22	7.32
0.08	0.01	0.10	0.01	22.22	0.77	26.45	8.09
0.10	0.01	0.12	0.02	26.45	0.85	31.49	8.95
0.12	0.01	0.14	0.03	31.49	0.94	37.48	9.89
0.14	0.01	0.17	0.04	37.48	1.04	44.81	10.92
0.17	0.01	0.20	0.05	44.81	1.13	53.10	12.06
0.20	0.02	0.24	0.07	53.10	1.23	63.20	13.29
0.24	0.02	0.29	0.09	63.20	1.34	75.23	14.62
0.29	0.02	0.34	0.11	75.23	1.49	89.55	16.11
0.34	0.02	0.40	0.13	89.55	1.78	108.59	17.87
0.40	0.03	0.48	0.16	108.59	2.20	128.87	20.07
0.48	0.03	0.57	0.19	128.87	2.88	151.01	22.93
0.57	0.04	0.68	0.23	151.01	3.73	179.75	26.66
0.68	0.06	0.81	0.29	179.75	4.71	213.95	31.37
0.81	0.08	0.97	0.37	213.95	5.88	254.88	37.03
0.97	0.10	1.15	0.47	254.88	8.41	303.12	43.44
1.15	0.13	1.37	0.60	303.12	8.85	360.81	50.30
1.37	0.16	1.63	0.78	360.81	8.95	429.48	57.25
1.63	0.19	1.94	0.95	429.48	8.74	511.19	63.98
1.94	0.23	2.31	1.17	511.19	8.40	608.48	70.38
2.31	0.28	2.75	1.44	608.48	8.04	724.24	78.43
2.75	0.30	3.27	1.74	724.24	5.85	862.08	82.07
3.27	0.34	3.89	2.07	862.08	5.14	1028.10	87.22
3.89	0.37	4.83	2.45	1028.10	4.48	1221.38	91.67
4.83	0.41	5.52	2.88	1221.38	3.57	1453.77	95.24
5.52	0.44	6.57	3.30	1453.77	2.58	1730.41	97.82
6.57	0.47	7.81	3.77	1730.41	1.57	2059.69	99.39
7.81	0.50	9.30	4.27	2059.69	0.59	2451.63	99.98
9.30	0.53	11.07	4.80	2451.63	0.02	2918.18	100.00
11.07	0.58	13.18	5.38	2918.18	0.00	3473.45	100.00

Figura 7.11 – Granulometria a laser em água – A3.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra			
Histórico: Certificado: 050/04	Run Number: 16	Medida:	
Arquivo: 050	Record Number: 66	Análise: Wed Jul 28 2004 2:25PM	
Sample Path: C:\SIZER\DATA\2004\		Fonte de Resultados: Média	
Notas: AMOSTRA: A3 gerusa (com 65% em peso passando em 200)			
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA SELMO			
Meio de Dispersão: Alcohol Isopropílico			
Veloc. bomba: 2500 rpm			

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 21.5 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000)]	Dispersant R.I. = 1.3300	Residual: 0.440 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração: 0.0448 %Vol	Densidade: 2.420 g / cub. cm	Area Superf. Espec.: 0.1848 sq. m / g
Diâmetros Médios:	D (v, 0.1) = 6.54 um	D (v, 0.5) = 75.35 um	D (v, 0.9) = 286.77 um
D [4, 3] = 116.04 um	D [3, 2] = 13.42 um	Span = 3.719E+00	Uniformidade = 1.168E+00

Diâm. Inferior (um)	No. Intervalo %	Diâm. Superior (um)	Acum. Absol. %	Diâm. Inferior (um)	No. Intervalo %	Diâm. Superior (um)	Acum. Absol. %
0.05	0.00	0.06	0.00	6.53	1.41	7.72	11.53
0.06	0.00	0.07	0.01	7.72	1.49	9.00	13.02
0.07	0.01	0.08	0.01	9.00	1.56	10.46	14.58
0.08	0.01	0.09	0.03	10.46	1.69	12.21	16.29
0.09	0.01	0.11	0.04	12.21	1.81	14.22	18.10
0.11	0.02	0.13	0.05	14.22	1.95	16.57	20.05
0.13	0.02	0.15	0.07	16.57	2.12	19.31	22.17
0.15	0.02	0.17	0.09	19.31	2.30	22.49	24.47
0.17	0.02	0.20	0.12	22.49	2.50	26.20	26.97
0.20	0.02	0.23	0.14	26.20	2.71	30.53	29.68
0.23	0.02	0.27	0.16	30.53	2.92	35.56	32.60
0.27	0.03	0.31	0.19	35.56	3.14	41.43	35.74
0.31	0.03	0.36	0.22	41.43	3.38	48.27	39.09
0.36	0.04	0.42	0.26	48.27	3.58	56.25	42.64
0.42	0.04	0.49	0.30	56.25	3.75	65.51	46.39
0.49	0.05	0.56	0.35	65.51	3.95	76.32	50.34
0.56	0.05	0.67	0.41	76.32	4.14	88.91	54.48
0.67	0.05	0.78	0.50	88.91	4.33	103.58	58.81
0.78	0.13	0.91	0.62	103.58	4.53	120.67	63.34
0.91	0.18	1.06	0.80	120.67	4.72	140.58	68.06
1.06	0.24	1.24	1.04	140.58	4.88	163.77	72.94
1.24	0.31	1.44	1.35	163.77	4.95	190.60	77.89
1.44	0.40	1.68	1.75	190.60	4.84	222.28	82.73
1.68	0.50	1.95	2.25	222.28	4.53	258.95	87.26
1.95	0.60	2.28	2.85	258.95	3.99	301.68	91.25
2.28	0.72	2.65	3.57	301.68	3.26	351.46	94.51
2.65	0.83	3.09	4.40	351.46	2.46	409.45	96.98
3.09	0.94	3.60	5.34	409.45	1.66	477.01	98.64
3.60	1.05	4.19	6.40	477.01	0.89	555.71	99.53
4.19	1.15	4.86	7.55	555.71	0.35	647.41	99.88
4.86	1.24	5.69	8.79	647.41	0.12	754.23	100.00
5.69	1.33	6.63	10.12	754.23	0.00	878.67	100.00

Melvern Instruments Ltd.
Melsbarn, UK
Tel: +44 (0)1654 852456 Fax: +44 (0)1654 892759

Masterizer 5 long bed Ver. 2.19
Serial Number: 33544-289

p. 22
30 Jul 04 09:35

Figura 7.12 – Granulometria a laser em álcool– A3.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra			
Histórico: Certificado: 051/04	Run Number: 18	Medida:	
Arquivo: 051	Record Number: 87	Análise: Fri Feb 13 2004 10:47AM	
Sample Path: C:\SIZER\DATA\2004\		Fonte de Resultados: Média	
Notas: AMOSTRA: A4 gerusa (com 70% em peso passando em 20#)			
CLIENTE: SILVA MARIA DE SOUZA SELMO			
Meio de Dispersão: água desionizada		Dispersante: calgon	
Veloc. bomba: 70%		ultrassom: 1 min.	

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 19.4 %
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000);	Dispersion R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse	Residual: 1.845 %		
Modifications: Active –	Blended with Record 22 :		

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração= 0.0970 %Vol	Densidade= 2.850 g / cub. cm	Area Superf. Espec.= 0.0883 sq. m / g
Díametros Médios:	D [v, 0.1] = 35.47 um	D [v, 0.5] = 284.68 um	D [v, 0.9] = 1308.70 um
D [H, 3] = 503.45 um	D [3, 2] = 34.15 um	Span = 4.473E+00	Uniformidade = 1.317E+00

Díam. Inferior (um)	No. Intervalo %	Díam. Superior (um)	Acum. Abaixo %	Díam. Inferior (um)	No. Intervalo %	Díam. Superior (um)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.06	0.00	13.18	0.83	15.89	8.35
0.06	0.00	0.07	0.00	15.89	0.67	18.67	7.02
0.07	0.00	0.08	0.00	18.67	0.72	22.22	7.74
0.08	0.00	0.10	0.01	22.22	0.78	28.45	8.52
0.10	0.00	0.12	0.01	28.45	0.85	31.49	9.37
0.12	0.01	0.14	0.02	31.49	0.95	37.48	10.31
0.14	0.01	0.17	0.03	37.48	1.07	44.81	11.38
0.17	0.01	0.20	0.04	44.81	1.24	53.10	12.62
0.20	0.01	0.24	0.05	53.10	1.47	63.20	14.09
0.24	0.02	0.29	0.07	63.20	1.81	75.23	15.90
0.29	0.02	0.34	0.08	75.23	2.27	88.55	18.17
0.34	0.02	0.40	0.11	88.55	2.88	108.59	21.04
0.40	0.03	0.48	0.13	108.59	3.82	128.87	24.86
0.48	0.04	0.57	0.17	128.87	4.43	151.01	29.10
0.57	0.05	0.68	0.22	151.01	5.21	179.75	34.30
0.68	0.06	0.81	0.28	179.75	5.80	213.95	40.10
0.81	0.09	0.97	0.37	213.95	8.08	254.68	48.18
0.97	0.11	1.15	0.48	254.68	5.94	303.12	52.11
1.15	0.14	1.37	0.62	303.12	5.51	360.81	57.62
1.37	0.17	1.63	0.80	360.81	4.91	429.48	62.53
1.63	0.21	1.94	1.00	429.48	4.35	511.19	68.88
1.94	0.25	2.31	1.25	511.19	4.07	608.48	70.95
2.31	0.29	2.75	1.54	608.48	4.13	724.24	75.07
2.75	0.33	3.27	1.88	724.24	4.33	862.08	79.40
3.27	0.37	3.89	2.23	862.08	4.48	1028.10	83.88
3.89	0.41	4.63	2.64	1028.10	4.44	1221.38	88.32
4.63	0.44	5.52	3.08	1221.38	4.08	1453.77	92.38
5.52	0.47	6.57	3.55	1453.77	3.30	1730.41	95.68
6.57	0.50	7.81	4.05	1730.41	2.28	2059.69	97.98
7.81	0.53	9.30	4.58	2059.69	1.29	2451.63	99.25
9.30	0.56	11.07	5.14	2451.63	0.81	2918.18	99.88
11.07	0.59	13.18	5.73	2918.18	0.14	3473.45	100.00

Figura 7.13 – Granulometria a laser em água – A4.

RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra									
Histórico: Certificado: 05164		Run Number: 15		Medida: Wed Jul 26 2004 2:38PM					
Arquivo: 051		Record Number: 86		Fonte de Resultado: Média					
Sample Path: C:\SIZE\DATA\0004\									
Nota: AMOSTRA: A4 gerada (com 70% em peso passando em 20µ)									
CLIENTE: SILVIA MARIA DE SOUZA BELMO									
Meio de Dispersão: álcool isopropílico									
Veloc. bomba: 2500 rpm									
Detalhes do Sistema									
Range Lens: 300RF mm		Beam Length: 2.40 mm		Sampler:					
Presentation: 30HD		[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000)]		Dispersant R.I. = 1.3300					
Analysis Model: Polydisperse				Obscuration: 19.3 %					
Modifications: None				Residual: 0.702 %					
Resultados Estatísticos									
Tipo de Distribuição: Volume		Concentração: 0.0367 %/vol		Densidade: 2.420 g / cub. cm					
Distribuição Média:		D (v, 0.1) = 5.78 µm		Área Superf. Espec. = 0.2088 sq. m / g					
D [A, 2] = 89.68 µm		D [3, 2] = 11.88 µm		D (v, 0.9) = 224.50 µm					
				Span = 3.743E+00					
				Uniformidade = 1.148E+00					
Diam. Inferior (µm)	No. Intervalo	%	Diam. Superior (µm)	Acum. Abaixo (%)	Diam. Inferior (µm)	No. Intervalo	%	Diam. Superior (µm)	Acum. Abaixo (%)
0.05	0.05	0.06	0.06	0.00	6.83	1.63	7.72	13.01	
0.06	0.00	0.07	0.01	0.01	7.72	1.72	9.00	14.73	
0.07	0.01	0.08	0.01	0.01	9.00	1.82	10.48	16.55	
0.08	0.01	0.09	0.02	0.02	10.48	1.93	12.21	18.49	
0.09	0.01	0.11	0.04	0.04	12.21	2.07	14.22	20.56	
0.11	0.02	0.13	0.06	0.06	14.22	2.23	16.57	22.79	
0.13	0.02	0.15	0.08	0.08	16.57	2.42	19.31	25.22	
0.15	0.03	0.17	0.11	0.11	19.31	2.64	22.49	27.85	
0.17	0.03	0.20	0.14	0.14	22.49	2.88	26.20	30.73	
0.20	0.03	0.23	0.17	0.17	26.20	3.13	30.53	33.88	
0.23	0.04	0.27	0.21	0.21	30.53	3.39	35.96	37.25	
0.27	0.04	0.31	0.25	0.25	35.96	3.68	41.43	40.91	
0.31	0.04	0.36	0.29	0.29	41.43	3.90	48.27	44.81	
0.36	0.04	0.42	0.33	0.33	48.27	4.12	55.23	48.93	
0.42	0.05	0.49	0.38	0.38	55.23	4.31	63.51	53.24	
0.49	0.05	0.56	0.43	0.43	63.51	4.46	73.32	57.70	
0.56	0.07	0.67	0.50	0.50	73.32	4.57	83.91	62.28	
0.67	0.09	0.78	0.59	0.59	83.91	4.64	103.58	66.93	
0.78	0.14	0.91	0.72	0.72	103.58	4.70	120.67	71.63	
0.91	0.19	1.06	0.91	0.91	120.67	4.70	140.58	76.33	
1.06	0.25	1.24	1.17	1.17	140.58	4.66	163.77	80.98	
1.24	0.33	1.44	1.50	1.50	163.77	4.53	190.80	85.49	
1.44	0.43	1.68	1.93	1.93	190.80	4.28	222.28	89.74	
1.68	0.54	1.95	2.46	2.46	222.28	3.75	258.95	93.49	
1.95	0.68	2.28	3.12	3.12	258.95	3.01	301.68	96.50	
2.28	0.79	2.65	3.91	3.91	301.68	2.08	351.46	98.57	
2.65	0.93	3.09	4.84	4.84	351.46	1.10	409.45	99.67	
3.09	1.08	3.60	5.90	5.90	409.45	0.27	477.01	99.94	
3.60	1.20	4.19	7.10	7.10	477.01	0.06	555.71	100.00	
4.19	1.32	4.88	8.42	8.42	555.71	0.00	647.41	100.00	
4.88	1.43	5.69	9.85	9.85	647.41	0.00	754.23	100.00	
5.69	1.53	6.63	11.39	11.39	754.23	0.00	878.67	100.00	

Melvern Instruments Ltd.
Melsvorn, UK
Tel: +44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892769

Masterizer 5 long bed Ver. 2.19
Serial Number: 33544-299

p. 23
30 Jul 04 09:36

Figura 7.14 – Granulometria a laser em álcool– A4.

7.4 Caracterização da areia normal brasileira

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas

1/1

**CERTIFICADO DE MATERIAL DE
REFERÊNCIA Nº 1.163
AREIA NBR 7214/82 – LOTE 24/11/03 A 28/11/03
AREIA NORMAL PARA ENSAIO DE CIMENTO**

Determinações em amostras médias semanais em lotes de até 5 toneladas

1.1 - Composição granulométrica – NBR-7217/87

Peneira nº	Abertura (mm)	Material retido acumulado (%)	Limites – NBR-7214/82
8	2,4	0	0
10	2,0	2	5 ± 5
16	1,2	25	25 ± 5
30	0,6	50	50 ± 5
50	0,3	75	75 ± 5
100	0,15	98	97 ± 3

1.2 – Outras determinações

Determinação	Resultado	Limites – NBR-7214/82
Material pulverulento – NBR-7219/87	0,0 %	≤ 1,0%
Umidade – NBR-7214/82	0,0 %	≤ 0,2%
Conglomerados argilosos – NBR-7214/82	0,0 %	≤ 1,0%
Teor de feldspato entre peneiras 2,4 e 1,2 mm NBR-7214/82	3,8 %	≤ 15,0%
Teor de mica entre peneiras 0,3 e 0,15 mm NBR-7214/82	1,3 %	≤ 2,0%
Matéria orgânica – NBR-NM-49/01	< 100 ppm	≤ 100 ppm

São Paulo, 04 de dezembro de 2.003

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil
Laboratório de Concreto

Engº Civil Me. Luiz Tsuguio Hamassaki
Responsável pelo Laboratório
CREA nº 84.933/D - RE. nº 2688.0

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil

Engº Civil Emanoel Silva
Chefe de Agrupamento
CREA nº 63.751/D - RE. nº 3587.3

7.5 Análises por DRX dos aglomerantes e agregados empregados nas argamassas

Figura 7.15 – Análise por DRX do cimento CP III 32 RS.

Tabela 7.2 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Cimento CP III 32 RS.

Código de referência	Nome do mineral (conforme ficha de referência do equipamento)	Fórmula química
49-0442	Calcium Silicate	Ca ₃ Si O ₅
24-0027	Calcite	Ca C O ₃
33-0303	Calcium Silicate	Ca ₂ Si O ₄
11-0357	Calcium Aluminum Oxide	Ca ₅ Al ₆ O ₁₄
33-0311	Gypsum, syn	Ca S O ₄ !2 H ₂ O

* Essas fichas devem ser confirmadas por análise mais apurada do difratograma em confronto com os demais resultados de caracterização química deste cimento (FRX, TG e DTG), pois cabe ainda identificar compostos característicos da adição empregada (escória de alto-forno).

Figura 7.16 – Análise por DRX do cimento CP II F 32.

Tabela 7.3 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Cimento CP II F 32.

Código de referência	Nome do mineral (conforme ficha de referência do equipamento)	Fórmula química
49-0442	Calcium Silicate	$\text{Ca}_3 \text{SiO}_5$
49-1673	Calcium Silicate	$\text{Ca}_2 \text{SiO}_4$
38-1429	tricalcium aluminate	$\text{Ca}_3 \text{Al}_2 \text{O}_6$
42-1469	Calcium Aluminum Iron Oxide	$\text{Ca}_2 \text{Al}_{1.38} \text{Fe}_{0.62} \text{O}_5$
37-0184	Calcium Sulfate	CaSO_4

* Essas fichas devem ser confirmadas por análise mais apurada do difratograma em confronto com os demais resultados de caracterização química deste cimento (FRX, TG e DTG).

Figura 7.17 – Análise por DRX da cal hidratada CH III.

Tabela 7.4 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Cal hidratada CH III.

Código de referência	Nome do mineral (conforme ficha de referência do equipamento)	Fórmula química
24-0027	Calcite	CaCO_3
36-0426	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
01-1079	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
02-1092	Brucite	$\text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$

Essas fichas devem ser confirmadas por análise mais apurada do difratograma em confronto com os demais resultados de caracterização química desta cal (FRX, TG e DTG).

Figura 7.18 – Análise por DRX do agregado reciclado A1.

Tabela 7.5 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Agregado reciclado A1.

Código de referência	Nome do mineral (referência do equipamento)	Fórmula química
11-0357	Calcium Aluminum Oxide	Ca ₅ Al ₆ O ₁₄
24-0027	Calcite	Ca C O ₃
49-0442	Calcium Silicate	Ca ₃ Si O ₅
33-0303	Calcium Silicate	Ca ₂ Si O ₄
46-1045	Quartz, syn	Si O ₂
25-0120	Calcium Aluminum Iron Oxide	Ca Al ₈ Fe ₄ O ₁₉
01-0527	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (O H) ₄
09-0464	Anorthite	Ca Al ₂ Si ₂ O ₈
45-0111	Silicon Oxide	Si O ₂

*Essas fichas devem ser confirmadas por análise mais apurada do difratograma em confronto com os demais resultados de caracterização química dos agregados (FRX; DTG e TG).

Figura 7.19 – Análise por DRX do agregado reciclado A2.

Tabela 7.6 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Agregado reciclado A2.

Código de referência	Nome do mineral (referência do equipamento)	Fórmula química
01-0527	Kaolinite	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$
09-0464	Anorthite	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$
11-0357	Calcium Aluminum Oxide	$\text{Ca}_5 \text{Al}_6 \text{O}_{14}$
24-0027	Calcite	CaCO_3
25-0120	Calcium Aluminum Iron Oxide	$\text{Ca Al}_8 \text{Fe}_4 \text{O}_{19}$
33-0303	Calcium Silicate	$\text{Ca}_2 \text{SiO}_4$
45-0111	Silicon Oxide	SiO_2
46-1045	Quartz, syn	SiO_2
49-0442	Calcium Silicate	$\text{Ca}_3 \text{SiO}_5$
36-0617	Bassanite, syn	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.67 \text{H}_2\text{O}$

*Essas fichas devem ser confirmadas por análise mais apurada do difratograma em confronto com os demais resultados de caracterização química dos agregados (FRX; DTG e TG).

Figura 7.20 – Análise por DRX do agregado reciclado A3.

Tabela 7.7 – Fichas* mineralógicas compatíveis com a DRX – Agregado reciclado A3.

Código de referência	Nome do mineral (referência do equipamento)	Fórmula química
11-0357	Calcium Aluminum Oxide	Ca ₅ Al ₆ O ₁₄
24-0027	Calcite	Ca C O ₃
49-0442	Calcium Silicate	Ca ₃ Si O ₅
33-0303	Calcium Silicate	Ca ₂ Si O ₄
46-1045	Quartz, syn	Si O ₂
25-0120	Calcium Aluminum Iron Oxide	Ca Al ₈ Fe ₄ O ₁₉
01-0527	Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (O H) ₄
09-0464	Anorthite	Ca Al ₂ Si ₂ O ₈
45-0111	Silicon Oxide	Si O ₂

*Essas fichas devem ser confirmadas por análise mais apurada do difratograma em confronto com os demais resultados de caracterização química dos agregados (FRX; DTG e TG).

Figura 7.21 – Análise por DRX do agregado reciclado A4.

Tabela 7.8 – Fichas mineralógicas compatíveis com a DRX – Agregado reciclado A4.

Código de referência	Nome do mineral (referência do equipamento)	Fórmula química
01-0527	Kaolinite	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$
09-0464	Anorthite	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$
11-0357	Calcium Aluminum Oxide	$\text{Ca}_5 \text{Al}_6 \text{O}_{14}$
24-0027	Calcite	Ca C O_3
25-0120	Calcium Aluminum Iron Oxide	$\text{Ca Al}_8 \text{Fe}_4 \text{O}_{19}$
33-0303	Calcium Silicate	$\text{Ca}_2 \text{Si O}_4$
45-0111	Silicon Oxide	Si O_2
46-1045	Quartz, syn	Si O_2

*Essas fichas devem ser confirmadas por análise mais apurada do difratograma em confronto com os demais resultados de caracterização química dos agregados (FRX; DTG e TG).

7.6 Determinações no IPT para teores de SO_3 , sulfatos e sais solúveis totais

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

1/2

RELATÓRIO DE ENSAIO N° 917 353-203

CLIENTE: Profa. Silvia Maria de Souza Selmo - PCC/USP

MATERIAL: Agregado reciclado

NATUREZA DO TRABALHO: Determinação de anidrido sulfúrico (SO_3)

REFERÊNCIA: Pedido de Ensaio de 26.10.2004

1 MATERIAL

Quatro (04) amostras declaradas pelo Cliente como "agregado reciclado", recebidas no Laboratório de Química de Materiais (LQM) do IPT em 26.10.2004. Na Tabela 1 estão descritas informações referentes a identificação das amostras.

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no IPT

Dados do Cliente	LQM N.º
Agregado Reciclado A1	17.646
Agregado Reciclado A2	17.647
Agregado Reciclado A3	17.648
Agregado Reciclado A4	17.649

2 MÉTODO UTILIZADO

- Anidrido sulfúrico (SO_3):

NBR-NM 16/04 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico" (DEC-LQM-PE-009).

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- Balança analítica eletrônica Ohaus E12140 (BAL-06) - Certificado de Calibração N.º 56.439 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 27.05.2005;
- Estufa - Marconi Mod MA 3351- (EST-02) - Verificação Interna - Validade: 26.02.2005;

Nota 1: Equipamento controlado no LQM por meio do registrador eletrônico (TER-08).

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado. Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT
Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária - Butantã - 05508-901 - São Paulo - SP - Tel: (11) 3767-4000 - www.ipt.br
Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC - Tel: (11) 3767-4126, 3767-4456 e 3767-4744 - Fax: (11) 3767-4002 - sac@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

2/2

Relatório de Ensaio N.º 917 353-203

- Mufla - Fornitec (MUF-01) - Patrimônio IPT N.º 35.203 - Verificação Interna - Validade: 25.02.2005;
Nota 2: Idem nota 1.
- Registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08).
Nota 3: Equipamento calibrado com os seguintes sensores de temperatura:
  - Sensor de temperatura CHINO do tipo K (K1), com bainha de aço inox de 1,0mm e isolamento mineral, acoplado ao registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08) – Certificado de Calibração N.º 52.018 – Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 24.10.2004;
  - Sensor de temperatura CHINO do tipo K (K2), com bainha de aço inox de 1,0mm e isolamento mineral, acoplado ao registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08) – Certificado de Calibração N.º 52.019 – Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 24.10.2004.
- Termômetro digital (TER-06) - Certificado de Calibração N.º 58.703 - Laboratório de Metrologia/IPT – Validade: 20.08.2005.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados de ensaio

Identificação do Cliente	LQM N.º	Resultados de anidrido sulfúrico (SO ₃), em %		
		Ensaio A	Ensaio B	MÉDIA
Agregado Reciclado A1	17.646	0,16	0,18	0,17
Agregado Reciclado A2	17.647	0,53	0,52	0,52
Agregado Reciclado A3	17.648	0,57	0,59	0,58
Agregado Reciclado A4	17.649	0,58	0,55	0,56

São Paulo, 29 de outubro de 2004.

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil
Lab. de Química de Materiais

Quím. M^º Valdecir Angelo Quarcioni
Responsável pelo Laboratório
CRQ n.º 04212772 - RE. n.º 6741.3

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil

Eng^º Civil Ernan Silva
Chefe do Agrupamento
CREA n.º 53.751/D - RE. n.º 3587.3

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado. Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 70 974 - 177

RELATÓRIO TÉCNICO N.º 70 974

NATUREZA DO TRABALHO: Determinação de sais e sulfatos solúveis em amostras de argamassa

CLIENTE: Silvia Maria de Souza Selmo

1 INTRODUÇÃO

O Cliente enviou ao IPT quarenta (40) amostras descritas como "argamassa" para a determinação de sais e sulfatos solúveis que foram preparadas no âmbito do projeto de mestrado da Eng.^a Gerusa Aguiar, orientanda da prof.^a Dr.^a Silvia Maria de Souza Selmo da Escola Politécnica da USP, que está estudando o emprego de agregados reciclados em argamassa.

As amostras foram recebidas no Laboratório de Química de Materiais (LQM) do IPT devidamente moídas e passantes em peneira ABNT n.º 20 (0,85mm). Na Tabela 1 estão apresentados dados complementares referentes à identificação das amostras.

Os ensaios foram executados conforme o Pedido de Ensaio de 15.03.2004.

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no LQM

Dados do Cliente	Dados do LQM		
	Data de recebimento	Massa (g)	LQM N.º
Argamassa T1 - 91 dias	29.03.04	50	17005
Argamassa T2 - 91 dias	15.03.04	100	17006
Argamassa T3 - 91 dias	15.03.04	90	17007
Argamassa T4 - 91 dias	15.03.04	80	17008

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 70.974 - 2/7

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no LQM - continuação

Dados do Cliente	Dados do LQM		
	Data de recebimento	Massa (g)	LQM N.º
Argamassa T5 - 91 dias	15.03.04	120	17009
Argamassa T6 - 91 dias	15.03.04	60	17010
Argamassa T7 - 91 dias	15.03.04	70	17011
Argamassa T8 - 91 dias	15.03.04	90	17012
Argamassa T9 - 91 dias	15.03.04	80	17013
Argamassa T10 - 91 dias	20.05.04	23	17014
Argamassa T11 - 91 dias	15.03.04	60	17015
Argamassa T12 - 91 dias	15.03.04	60	17016
Argamassa T13 - 91 dias	15.03.04	70	17017
Argamassa T14 - 91 dias	15.03.04	70	17018
Argamassa T15 - 91 dias	20.05.04	27	17019
Argamassa T16 - 91 dias	15.03.04	80	17020
Argamassa T17 - 91 dias	15.03.04	95	17021
Argamassa T18 - 91 dias	15.03.04	110	17022
Argamassa T19 - 91 dias	15.03.04	75	17023
Argamassa T20 - 91 dias	20.05.04	18	17024
Argamassa T1 - 63 dias	30.03.04	66	17094
Argamassa T2 - 63 dias	30.03.04	89	17095
Argamassa T3 - 63 dias	30.03.04	101	17096
Argamassa T4 - 63 dias	30.03.04	108	17097
Argamassa T5 - 63 dias	30.03.04	149	17098

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 70 974 - 3/7

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no LQM - continuação

Dados do Cliente	Dados do LQM		
	Data de recebimento	Massa (g)	LQM N.º
Argamassa T6 - 63 dias	30.03.04	23	17099
Argamassa T7 - 63 dias	30.03.04	25	17100
Argamassa T8 - 63 dias	30.03.04	24	17101
Argamassa T9 - 63 dias	30.03.04	21	17102
Argamassa T10 - 63 dias	30.03.04	50	17103
Argamassa T11 - 63 dias	30.03.04	21	17104
Argamassa T12 - 63 dias	30.03.04	20	17105
Argamassa T13 - 63 dias	30.03.04	20	17106
Argamassa T14 - 63 dias	30.03.04	20	17107
Argamassa T15 - 63 dias	30.03.04	38	17108
Argamassa T16 - 63 dias	30.03.04	21	17109
Argamassa T17 - 63 dias	30.03.04	19	17110
Argamassa T18 - 63 dias	30.03.04	25	17111
Argamassa T19 - 63 dias	30.03.04	21	17112
Argamassa T20 - 63 dias	30.03.04	42	17113

2 METODOLOGIA EMPREGADA

As amostras foram recebidas no IPT acondicionadas em sacos plásticos e moídas até passantes em peneira ABNT n.º 20 (0,85mm).

Os ensaios químicos foram executados de acordo com diretrizes gerais dos seguintes documentos:

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 70.974 - 4/7

- NBR 9917/87 - Agregados para concretos - Determinação de sais, íons cloretos e íons sulfatos solúveis.
- QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEIXO, D. M. Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassa endurecidas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5º, São Paulo, 2003.

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- Balança analítica eletrônica Ohaus E12140 (BAL-06) - Certificado de Calibração N.º 56.439 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 27.05.2005;
- Balança analítica - Bosch SAE 200 (BAL-05) - Certificado de Calibração N.º 50.980 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 04.09.2004;
- Estufa - Marconi Mod MA 3351- (EST-02) - Verificação Interna - Validade: 02.10.2004;

Nota 1: Equipamento controlado no LQM por meio do registrador eletrônico (TER-08).

- Mufla - Fornitec (MUF-01) - Patrimônio IPT N.º 35.203 - Verificação Interna - Validade: 13.08.2004;

Nota 2: Idem nota 1.

- Termômetro digital (TER-06) - Certificado de Calibração N.º 49.518 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 25.06.2004.

- Registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08).

Nota 3: Equipamento calibrado com os seguintes sensores de temperatura:

Sensor de temperatura CHINO do tipo K (K1), com bainha de aço inox de 1,0mm e isolamento mineral, acoplado ao registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08) - Certificado de Calibração N.º 52.018 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 24.10.2004;

Sensor de temperatura CHINO do tipo K (K2), com bainha de aço inox de 1,0mm e isolamento mineral, acoplado ao registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08) - Certificado de Calibração N.º 52.019 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 24.10.2004;

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 70.974 - 5/7

4 RESULTADOS

Os resultados de ensaio das diversas amostras estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados de ensaio

Identificação das amostras		Resultados, em %	
LQM N.º	Dados do Cliente	Sulfato (SO_4^{2-})	Salis solúveis
17005	Argamassa T1 - 91 dias	0,11	0,83
17006	Argamassa T2 - 91 dias	0,19	0,56
17007	Argamassa T3 - 91 dias	0,20	0,66
17008	Argamassa T4 - 91 dias	0,24	0,77
17009	Argamassa T5 - 91 dias	0,02	2,14
17010	Argamassa T6 - 91 dias	0,11	0,61
17011	Argamassa T7 - 91 dias	0,31	0,86
17012	Argamassa T8 - 91 dias	0,31	0,84
17013	Argamassa T9 - 91 dias	0,31	0,98
17014	Argamassa T10 - 91 dias	0,02	2,14
17015	Argamassa T11 - 91 dias	0,10	0,83
17016	Argamassa T12 - 91 dias	0,18	0,90
17017	Argamassa T13 - 91 dias	0,17	0,80
17018	Argamassa T14 - 91 dias	0,17	0,84
17019	Argamassa T15 - 91 dias	0,02	1,77
17020	Argamassa T16 - 91 dias	0,10	0,83
17021	Argamassa T17 - 91 dias	0,13	0,78
17022	Argamassa T18 - 91 dias	0,12	0,78
17023	Argamassa T19 - 91 dias	0,12	0,75
17024	Argamassa T20 - 91 dias	0,03	2,37

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 70 974 - 6/7

Tabela 2: Resultados de ensaio - continuação

Identificação das amostras		Resultados, em %	
LQM N.º	Dados do Cliente	Sulfato (SO_4^{2-})	Sais solúveis
17094	Argamassa T1 - 63 dias	0,09	0,44
17095	Argamassa T2 - 63 dias	0,15	0,63
17096	Argamassa T3 - 63 dias	0,14	0,64
17097	Argamassa T4 - 63 dias	0,16	0,66
17098	Argamassa T5 - 63 dias	0,03	2,36
17099	Argamassa T6 - 63 dias	0,12	0,67
17100	Argamassa T7 - 63 dias	0,20	0,87
17101	Argamassa T8 - 63 dias	0,23	0,91
17102	Argamassa T9 - 63 dias	0,23	0,94
17103	Argamassa T10 - 63 dias	0,02	2,57
17104	Argamassa T11 - 63 dias	0,12	0,87
17105	Argamassa T12 - 63 dias	0,15	1,00
17106	Argamassa T13 - 63 dias	0,19	0,90
17107	Argamassa T14 - 63 dias	0,15	0,86
17108	Argamassa T15 - 63 dias	0,04	2,76
17109	Argamassa T16 - 63 dias	0,07	0,81
17110	Argamassa T17 - 63 dias	0,10	0,81
17111	Argamassa T18 - 63 dias	0,10	0,63
17112	Argamassa T19 - 63 dias	0,09	0,82
17113	Argamassa T20 - 63 dias	0,04	2,65

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 70.974 - 7/7

5 EQUIPE TÉCNICA

Valdecir Angelo Quaricioni - *Químico*

Daniel Martins Aleixo - *Químico*

José Francisco de Paula - *Técnico Químico*

Mário Sergio Guilge - *Técnico Químico*

São Paulo, 25 de maio de 2004.

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil
Lab. de Química de Materiais

Quím. M^o Valdecir Angelo Quaricioni
Responsável pelo Laboratório
CRQ nº 04212772 - RE. nº 6741.3

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil

Eng.º Civil Ernani Silva
Chefe do Agrupamento
CREA nº 63.751/D - RE. nº 3587.3

1/2

RELATÓRIO DE ENSAIO N° 917 353-203

CLIENTE: Profa. Silvia Maria de Souza Selmo - PCC/USP

MATERIAL: Agregado reciclado

NATUREZA DO TRABALHO: Determinação de anidrido sulfúrico (SO_3)

REFERÊNCIA: Pedido de Ensaio de 26.10.2004

1 MATERIAL

Quatro (04) amostras declaradas pelo Cliente como "agregado reciclado", recebidas no Laboratório de Química de Materiais (LQM) do IPT em 26.10.2004. Na Tabela 1 estão descritas informações referentes a identificação das amostras.

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no IPT

Dados do Cliente	LQM N.º
Agregado Reciclado A1	17.646
Agregado Reciclado A2	17.647
Agregado Reciclado A3	17.648
Agregado Reciclado A4	17.649

2 MÉTODO UTILIZADO

- Anidrido sulfúrico (SO_3):

NBR-NM 16/04 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico" (DEC-LQM-PE-009).

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- Balança analítica eletrônica Ohaus E12140 (BAL-06) - Certificado de Calibração N.º 56.439 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 27.05.2005;
- Estufa - Marconi Mod MA 3351- (EST-02) - Verificação Interna - Validade: 26.02.2005;

Nota 1: Equipamento controlado no LQM por meio do registrador eletrônico (TER-08).

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

2/2

Relatório de Ensaio N.º 817 353-203

- Mufla - Fornitec (MUF-01) - Patrimônio IPT N.º 35.203 - Verificação Interna - Validade: 25.02.2005;
Nota 2: Idem nota 1.
- Registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08).
Nota 3: Equipamento calibrado com os seguintes sensores de temperatura:
  - Sensor de temperatura CHINO do tipo K (K1), com bainha de aço inox de 1,0mm e isolamento mineral, acoplado ao registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08) – Certificado de Calibração N.º 52.018 – Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 24.10.2004;
  - Sensor de temperatura CHINO do tipo K (K2), com bainha de aço inox de 1,0mm e isolamento mineral, acoplado ao registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08) – Certificado de Calibração N.º 52.019 – Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 24.10.2004
- Termômetro digital (TER-06) - Certificado de Calibração N.º 58.703 - Laboratório de Metrologia/IPT – Validade: 20.08.2005.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados de ensaio

Identificação do Cliente	LQM N.º	Resultados de anidrido sulfúrico (SO ₃), em %		
		Ensaio A	Ensaio B	MÉDIA
Agregado Reciclado A1	17.646	0,16	0,18	0,17
Agregado Reciclado A2	17.647	0,53	0,52	0,52
Agregado Reciclado A3	17.648	0,57	0,59	0,58
Agregado Reciclado A4	17.649	0,58	0,55	0,56

São Paulo, 29 de outubro de 2004.

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil
Lab. de Química de Materiais

Quelli M. Valdecir Angelo Quarcioni
Responsável pelo Laboratório
CRO n.º 84312772 - RE. n.º 67413

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil

Eng.º Civil Emar Silva
Chefe do Agrupamento
CREA n.º 53.751/D - RE. n.º 35873

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 72 623-205 - 1/7

RELATÓRIO TÉCNICO N.º 72 623-205

NATUREZA DO TRABALHO: Determinação de sais e sulfatos solúveis em amostras de argamassa e agregados reciclados.

CLIENTE: Eng.^a Sílvia Maria de Souza Selmo

1 INTRODUÇÃO

O Cliente enviou ao IPT quarenta (40) amostras descritas como "argamassa" e quatro (04) descritas como "agregados reciclados" para a determinação de sais e sulfatos solúveis que foram preparadas no âmbito do projeto de mestrado da Eng.^a Gerusa Aguiar, orientanda da prof.^a Dr.^a Sílvia Maria de Souza Selmo da Escola Politécnica da USP, que está estudando o emprego de agregados reciclados em argamassa.

As amostras foram recebidas no Laboratório de Química de Materiais (LQM) do IPT devidamente moídas e passantes em peneira ABNT n.º 20 (0,85mm). Na Tabela 1 estão apresentados dados complementares referentes à identificação das amostras.

Os ensaios foram executados conforme o Pedido de Ensaio de 15.03.2004.

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no LQM

Dados do Cliente	Dados do LQM		
	Data de recebimento	Massa (g)	LQM N.º
Argamassa T1 - 175 dias	06.08.04	26	17626
Argamassa T2 - 175 dias	16.08.04	37	17627
Argamassa T3 - 175 dias	06.08.04	33	17628
Argamassa T4 - 175 dias	18.08.04	31	17629

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 72 623-205 - 2/7

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no LQM - continuação

Dados do Cliente	Dados do LQM		
	Data de recebimento	Massa (g)	LQM N.º
Argamassa T5 - 175 dias	06.08.04	34	17630
Argamassa T6 - 175 dias	06.08.04	14	17631
Argamassa T7 - 175 dias	06.08.04	18	17632
Argamassa T8 - 175 dias	06.08.04	27	17633
Argamassa T9 - 175 dias	06.08.04	19	17634
Argamassa T10 - 175 dias	06.08.04	48	17635
Argamassa T11 - 175 dias	06.08.04	27	17636
Argamassa T12 - 175 dias	06.08.04	27	17637
Argamassa T13 - 175 dias	18.08.04	31	17638
Argamassa T14 - 175 dias	06.08.04	26	17639
Argamassa T15 - 175 dias	06.08.04	37	17640
Argamassa T16 - 175 dias	18.08.04	29	17641
Argamassa T17 - 175 dias	06.08.04	24	17642
Argamassa T18 - 175 dias	06.08.04	29	17643
Argamassa T19 - 175 dias	06.08.04	21	17644
Argamassa T20 - 175 dias	06.08.04	46	17645
Agregado Reciclado A1	18.08.04	55	17646
Agregado Reciclado A2	18.08.04	75	17647
Agregado Reciclado A3	18.08.04	90	17648
Agregado Reciclado A4	18.08.04	60	17649

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 72.623-205 - 3/7

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no LQM - continuação

Dados do Cliente	Dados do LQM		
	Data de recebimento	Massa (g)	LQM N.º
Argamassa T1 NC - 175 dias	18.08.04	32	17675
Argamassa T2 NC - 175 dias	18.08.04	32	17676
Argamassa T3 NC - 175 dias	16.08.04	20	17677
Argamassa T4 NC - 175 dias	16.08.04	19	17678
Argamassa T5 NC - 175 dias	18.08.04	31	17679
Argamassa T6 NC - 175 dias	18.08.04	33	17680
Argamassa T7 NC - 175 dias	18.08.04	30	17681
Argamassa T8 NC - 175 dias	16.08.04	17	17682
Argamassa T9 NC - 175 dias	18.08.04	29	17683
Argamassa T10 NC - 175 dias	16.08.04	39	17684
Argamassa T11 NC - 175 dias	18.08.04	15	17685
Argamassa T12 NC - 175 dias	18.08.04	29	17686
Argamassa T13 NC - 175 dias	16.08.04	29	17687
Argamassa T14 NC - 175 dias	16.08.04	24	17688
Argamassa T15 NC - 175 dias	16.08.04	51	17689
Argamassa T16 NC - 175 dias	16.08.04	24	17690
Argamassa T17 NC - 175 dias	16.08.04	20	17691
Argamassa T18 NC - 175 dias	16.08.04	21	17692
Argamassa T19 NC - 175 dias	16.08.04	25	17693
Argamassa T20 NC - 175 dias	16.08.04	37	17694

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMC/DEC

Relatório Técnico nº 72 623-205 - 4/7

2 METODOLOGIA EMPREGADA

As amostras foram recebidas no IPT acondicionadas em sacos plásticos e moidas até passantes em peneira ABNT n.º 20 (0,85mm).

Os ensaios químicos foram executados de acordo com diretrizes gerais dos seguintes documentos:

- NBR 9917/87 - Agregados para concretos - Determinação de sais, ions cloretos e ions sulfatos solúveis.
- QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEIXO, D. M. Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassa endurecidas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5º, São Paulo, 2003.

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- Balança analítica eletrônica Ohaus E12140 (BAL-06) - Certificado de Calibração N.º 58.439 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 27.05.2005;
- Estufa - Marconi Mod MA 3351- (EST-02) - Verificação Interna - Validade: 02.10.2004;
Nota 1: Equipamento controlado no LQM por meio do registrador eletrônico (TER-08).
- Mufla - Fomitec (MUF-01) - Patrimônio IPT N.º 35.203 - Verificação Interna - Validade: 25.02.2005;
Nota 2: Idem nota 1.
- Termômetro digital (TER-06) - Certificado de Calibração N.º 58.703 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 20.08.2005.
- Registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08).

Nota 3: Equipamento calibrado com os seguintes sensores de temperatura:

Sensor de temperatura CHINO do tipo K (K1), com bainha de aço inox de 1,0mm e isolamento mineral, acoplado ao registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08) - Certificado de Calibração N.º 52.018 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 24.10.2004;

Sensor de temperatura CHINO do tipo K (K2), com bainha de aço inox de 1,0mm e isolamento mineral, acoplado ao registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-08) - Certificado de Calibração N.º 52.019 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 24.10.2004;

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 72 623-205 - 5/7

4 RESULTADOS

Os resultados de ensaio das diversas amostras estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados de ensaio

Identificação das amostras		Resultados, em %	
LQM N.º	Dados do Cliente	Sulfato (SO_4^{2-})	Sais solúveis
17626	Argamassa T1 - 175 dias	0,17	0,92
17627	Argamassa T2 - 175 dias	0,37	1,36
17628	Argamassa T3 - 175 dias	0,39	1,18
17629	Argamassa T4 - 175 dias	0,43	1,23
17630	Argamassa T5 - 175 dias	0,05	1,98
17631	Argamassa T6 - 175 dias	0,16	0,86
17632	Argamassa T7 - 175 dias	0,38	0,75
17633	Argamassa T8 - 175 dias	0,47	1,26
17634	Argamassa T9 - 175 dias	0,49	1,35
17635	Argamassa T10 - 175 dias	0,05	1,32
17636	Argamassa T11 - 175 dias	0,13	0,76
17637	Argamassa T12 - 175 dias	0,25	0,78
17638	Argamassa T13 - 175 dias	0,26	1,00
17639	Argamassa T14 - 175 dias	0,24	0,92
17640	Argamassa T15 - 175 dias	0,03	1,94
17641	Argamassa T16 - 175 dias	0,19	1,68
17642	Argamassa T17 - 175 dias	0,21	0,90
17643	Argamassa T18 - 175 dias	0,19	0,98
17644	Argamassa T19 - 175 dias	0,21	1,01
17645	Argamassa T20 - 175 dias	0,03	2,47

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 72 623-205 - 6/7

Tabela 2: Resultados de ensaio - continuação

Identificação das amostras		Resultados, em %	
LQM N.º	Dados do Cliente	Sulfato (SO_4^{2-})	Sais solúveis
17646	Agregado Reciclado A1	0,08	0,66
17647	Agregado Reciclado A2	0,26	1,14
17648	Agregado Reciclado A3	0,25	0,97
17649	Agregado Reciclado A4	0,21	1,33
17675	Argamassa T1 NC - 175 dias	0,15	0,98
17676	Argamassa T2 NC - 175 dias	0,30	1,21
17677	Argamassa T3 NC - 175 dias	0,31	1,01
17678	Argamassa T4 NC - 175 dias	0,36	1,00
17679	Argamassa T5 NC - 175 dias	0,05	2,14
17680	Argamassa T6 NC - 175 dias	0,14	0,77
17681	Argamassa T7 NC - 175 dias	0,38	1,44
17682	Argamassa T8 NC - 175 dias	0,44	1,33
17683	Argamassa T9 NC - 175 dias	0,46	1,78
17684	Argamassa T10 NC - 175 dias	0,05	1,84
17685	Argamassa T11 NC - 175 dias	0,12	0,66
17686	Argamassa T12 NC - 175 dias	0,21	1,08
17687	Argamassa T13 NC - 175 dias	0,25	0,92
17688	Argamassa T14 NC - 175 dias	0,31	1,12
17689	Argamassa T15 NC - 175 dias	0,05	2,00

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Química de Materiais/AMCC/DEC

Relatório Técnico nº 72.623-205 - 7/7

Tabela 2: Resultados de ensaio - continuação

Identificação das amostras		Resultados, em %	
LQM N.º	Dados do Cliente	Sulfato (SO_4^{2-})	Sais solúveis
17690	Argamassa T16 NC - 175 dias	0,08	0,71
17691	Argamassa T17 NC - 175 dias	0,12	0,95
17692	Argamassa T18 NC - 175 dias	0,17	1,01
17693	Argamassa T19 NC - 175 dias	0,15	0,90
17694	Argamassa T20 NC - 175 dias	0,02	2,45

5 EQUIPE TÉCNICA Daniel Martins Aleixo - *Químico*José Francisco de Paula - *Técnico Químico*

São Paulo, 15 de setembro de 2004.

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil
Lab. de Química de Materiais

Quím. Mª Valdeci Angelo Quaresoni
Responsável pelo Laboratório
CRQ nº 04212772 - RE. nº 6741.3

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil

Engº Civil Enail Silva
Chefe do Agrupamento
CREA nº 53.751/D - RE. nº 3587.3

7.7 Curvas DTG das argamassas – identificação e interpretação básica de alguns picos

A Figura 7.22 até a Figura 7.41 mostram as curvas TG e DTG obtidas para cada argamassa ao longo das três idades de análise (63 dias, 91 dias e 175 dias). A cor das curvas é sempre a mesma em função da idade da argamassa:

- curvas verdes para termogravimetria após ensaios de 63 dias;
- curvas vermelhas para termogravimetria após ensaios de 91 dias;
- curvas azuis para termogravimetria após ensaios de 175 dias – argamassas cicladas;
- curvas roxas para termogravimetria após ensaios de 175 dias – argamassas não cicladas.

A seguir será feita a análise das curvas DTG, sendo que a análise das curvas TG foi feita no item 4.3.4. Para facilitar a análise, as curvas serão observadas por grupos de argamassa pelos itens que seguem.

7.7.1 Grupo G6 – Argamassas T1 a T5

As argamassas com agregado reciclado deste grupo (T1 a T4), cujas curvas DTG (63 dias até 175 dias de idade) estão mostradas nas Figura 7.22 até a Figura 7.25 apresentam 5 picos em comum. Desses pode-se melhor descrever os seguintes:

- Pico I e adjacências – intensidade máxima entre 100 °C e 150 °C, aproximadamente – esse pico pode corresponder à desidratação de C-S-H, gipsita e sulfoaluminatos. Não é possível precisar a ocorrência de algumas reações menores acopladas a este pico principal e mais próximas a 200 °C;
- Pico III – intensidade máxima entre 450 °C e 550 °C, aproximadamente – pode representar a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e apresentou tendência a se pronunciar em função do aumento de idade das argamassas;

Outros picos que também precisariam ser ainda melhor investigados³³ por técnicas complementares (DRX e ATG) são os seguintes:

- Pico II – intensidade máxima próxima a 300 °C, aproximadamente - apresenta tendência a aumentar de intensidade aos 175 dias nas quatro argamassas cicladas (curvas de cor azul);
- Pico IV – intensidade máxima entre 625 °C e 725 °C, aproximadamente e com aumento nítido de intensidade ao longo das três idades de ensaio consideradas e com perfil mais próximos para as duas condições de cura aos 175 dias (argamassas cicladas e não cicladas). Este pico não pode ser visualizado na argamassa com consumo de cimento equivalente, de agregado quartzoso e contendo cal hidratada (T5);
- Pico V – intensidade máxima entre 725 °C e 825 °C;
- outros menores acima de 825 °C (por exemplo o pico com intensidade máxima entre 825 °C e 875 °C, aproximadamente e que aparece apenas no ensaio de 175 dias das quatro argamassas cicladas).

A curva DTG da argamassa com areia normal deste grupo (T5) é mostrada na Figura 7.26 e foi analisada separadamente já que essa argamassa contém cal hidratada na sua composição e areia quartzosa, ao invés de agregado reciclado:

- Pico I – intensidade máxima entre 100 °C e 125 °C, aproximadamente – esse pico pode corresponder à desidratação de C-S-H, gipsita e sulfoaluminatos;
- Pico II – intensidade máxima entre 150 °C e 200 °C, aproximadamente – esse pico pode corresponder a algum composto de reação da cal utilizada nesta argamassa, envolvendo ou não os produtos de hidratação do cimento CP III, já que não aparece de forma nítida nas curvas DTG's dos grupos G6 e G9 e volta a aparecer em G12. No caso da argamassa T5, este pico se modificou nitidamente em ambas as curvas de 175 dias;

---

³³ Argilominerais do tijolo maciço usado nas alvenarias geradoras dos agregados reciclados (o processo de fabricação de cerâmica é artesanal, na região de Socorro – SP) e / ou de produtos da hidratação do cimento CP III.

- Pico III – intensidade máxima entre 250 °C e 325 °C, aproximadamente; e Pico IV – intensidade máxima entre 350 °C e 425 °C, aproximadamente; e Pico V – intensidade máxima entre 425 °C e 500 °C, aproximadamente: esses picos correspondem a produto(s) de reação da cal utilizada nessa argamassa ou a seus hidróxidos, já que não aparece de forma nítida nas curvas DTG's dos grupos G6 e G9 e volta a aparecer em G12. O pico V pode ser atribuído à decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2);
- Pico VI – intensidade máxima entre 750 °C e 775 °C, aproximadamente e ocorreu para as argamassas com 91 e 175 dias (cicladas e não cicladas, sendo de maior intensidade para essa última);
- Pico VII – intensidade máxima entre 775 °C e 825 °C, aproximadamente: decomposição de carbonatos. Apenas ocorreu para a argamassa aos 63 dias e parece ter se deslocado nas idades subsequentes para o pico anterior descrito.

Figura 7.22 – Curvas TG e DTG – Argamassa T1.

Figura 7.23 – Curvas TG e DTG – Argamassa T2.

Figura 7.24 – Curvas TG e DTG – Argamassa T3.

Figura 7.25 – Curvas TG e DTG – Argamassa T4.

Figura 7.26 – Curvas TG e DTG – Argamassa T5.

7.7.2 Grupo G9 – Argamassas T6 a T10

As argamassas com agregado reciclado deste grupo (T6 a T9), cujas curvas DTG (63 dias até 175 dias de idade) estão mostradas na Figura 7.27 até a Figura 7.30 apresentam os mesmos 5 picos do grupo anterior (G6). A descrição pode ser muito similar a que consta no item 7.7.2 ou seja:

- Pico I e adjacências – intensidade máxima entre 100 °C e 175 °C, aproximadamente – esse pico pode corresponder à desidratação de C-S-H, gipsita e sulfoaluminatos. Não é possível precisar a ocorrência de reações menores acopladas a este pico principal e mais próximas a 200 °C, mas há indícios da sua presença principalmente em T6 e T8 (175 dias não ciclados) e T9 (175 dias, argamassa ciclada e não ciclada);
- Pico III – intensidade máxima entre 450 °C e 550 °C, aproximadamente – pode representar a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e apresentou tendência a se pronunciar em função do aumento de idade das argamassas;

Outros picos que também precisariam ser ainda mais investigados³⁴ por técnicas complementares (DRX e ATG) são os seguintes:

- Pico II – intensidade máxima próxima a 300 °C, aproximadamente – apresentou tendência a aumentar de intensidade aos 175 dias, nas quatro argamassas cicladas (curvas de cor azul);
- Pico IV – intensidade máxima entre 625 °C e 725 °C, aproximadamente e com aumento nítido de intensidade ao longo das três idades de ensaio consideradas e com perfil mais próximos para as duas condições de cura aos 175 dias (argamassas cicladas e não cicladas). Este pico não pode ser visualizado na argamassa com consumo de cimento equivalente, mas de agregado quartzoso e contendo cal hidratada (T10).

---

³⁴ Argilominerais do tijolo maciço usado nas alvenarias geradoras dos agregados reciclados (o processo de fabricação de cerâmica é artesanal, na região de Socorro – SP) e / ou de produtos da hidratação do cimento CP III.

- Pico V – intensidade máxima entre 725 °C e 825 °C;
- e outras pequenas reações acima de 825 °C, que mostram tendência a se formar apenas nas curvas de 175 dias em ambas as condições de cura, mas não são perceptíveis na argamassa mista com cal, de agregado quartzoso e com consumo de cimento equivalente (T10).

A curva DTG da argamassa com areia normal deste grupo (T10) é mostrada na Figura 7.31 e foi analisada separadamente já que há cal hidratada na sua composição e contém areia quartzosa, ao invés de agregado reciclado:

- Pico I – intensidade máxima entre 100 °C e 125 °C, aproximadamente – esse pico pode corresponder a desidratação de C-S-H, gipsita e sulfoaluminatos;
- reações pequenas e muito pouco pronunciadas entre 150 °C e 300 °C, aproximadamente – e podem ser relacionadas à diminuição dos produtos de hidratação do cimento CP III, que nessa argamassa foi menor (em relação a T5), enquanto aumentou o consumo de cal hidratada;
- Pico II – intensidade máxima entre 350 °C e 425 °C, aproximadamente – destaca-se entre os da argamassa T10 e caberia ser melhor investigado. Foi nitidamente constante e não variou em função da idade e da ciclagem das argamassas;
- Pico III – intensidade máxima entre 425 °C e 500 °C, aproximadamente – esse pico provavelmente ocorre pela cal hidratada presente nessa argamassa e pode representar a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2);
- Pico IV – intensidade máxima entre 750 °C e 775 °C, aproximadamente e Pico V – intensidade máxima entre 775 °C e 850 °C, aproximadamente – decomposição de carbonatos. Parece ter ocorrido deslocamentos e pronunciamento nítido desses picos da idade inicial investigada em relação às idades subseqüentes.

Figura 7.27 – Curvas TG e DTG – Argamassa T6.

Figura 7.28 – Curvas TG e DTG – Argamassa T7.

Figura 7.29 – Curvas TG e DTG – Argamassa T8.

Figura 7.30 – Curvas TG e DTG – Argamassa T9.

Figura 7.31 – Curvas TG e DTG – Argamassa T10.

7.7.3 Grupo G12 – Argamassas T11 a T15

As argamassas com agregado reciclado deste grupo (T11 a T14), cujas curvas DTG (63 dias até 175 dias de idade) estão mostradas na Figura 7.32 até a Figura 7.35 apresentam 8 picos em comum. Neste trabalho, pode-se destacar os 2 seguintes:

- Pico I – intensidade máxima entre 100 °C e 150 °C, aproximadamente – esse pico pode corresponder a desidratação de C-S-H, gipsita e sulfoaluminatos;
- Pico II – intensidade máxima entre 150 °C e 200 °C, aproximadamente – esse pico é mais nítido apenas para as argamassas não cicladas de T11, T13 e T14 (63 dias e 175 dias – NC) e precisaria ser melhor investigado, podendo talvez ser associado a reações ou produtos da cal usada nesse grupo, pois aparece aqui melhor caracterizado do que nas curvas DTG's dos grupos G6 e G9.

Os demais picos de DTG que precisariam ser ainda mais investigados³⁵ por técnicas complementares (DRX e ATG) são os seguintes:

- Pico III – intensidade máxima entre 250 °C e 325 °C, aproximadamente – apresenta uma ordenação repetitiva e com tendência a aumentar de intensidade aos 175 dias das quatro argamassas não cicladas (curvas de cor roxa sempre mais baixa);
- Pico IV – intensidade máxima entre 375 °C e 450 °C, aproximadamente – com comportamento bem similar ao pico anterior;
- Pico V – intensidade máxima entre 450 °C e 550 °C, aproximadamente – esse pico acontece em função do uso da cal nessas argamassas e pode representar a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Apresenta menor intensidade na argamassa T14, enquanto nas outras três alcançou valores de maior intensidade;

---

³⁵ Argilominerais do tijolo maciço usado nas alvenarias geradoras dos agregados reciclados (o processo de fabricação de cerâmica é artesanal, na região de Socorro – SP) e / ou de produtos da hidratação do cimento CP III.

- Pico VI – intensidade máxima entre 625 °C e 725 °C, aproximadamente – esse pico é da faixa de carbonatos e foi nitidamente mais pronunciado para as quatro argamassas cicladas e aos 175 dias de idade. Essas curvas azuis se diferenciam bastante das curvas das mesmas argamassas não cicladas e de mesma idade (cor roxa). Nas quatro argamassas, as curvas de cor roxa (175 dias – NC) situam-se bem mais próximas das curvas das argamassas em sua idade inicial (63 dias e também não cicladas);
- Pico VII – intensidade máxima entre 725 °C e 825 °C, aproximadamente - esse pico também é da faixa de carbonatos e apresenta comportamento similar ao pico VI;
- Pico VIII – intensidade máxima entre 825 °C e 900 °C, aproximadamente – corresponde a faixa de carbonatos e apresentou intensidade ligeiramente mais pronunciada para as argamassas mantidas em câmara seca e aos 175 dias (ver T11).

A curva DTG da argamassas com areia normal deste grupo (T15) é mostrada na Figura 7.36 e foi analisada separadamente pois essa argamassa contém cal hidratada na sua composição e areia quartzosa, ao invés de agregado reciclado:

- Pico I – intensidade máxima entre 100 °C e 150 °C, aproximadamente – esse pico corresponde ao C-S-H, gipsita e aos sulfoaluminatos;
- Pico II e outras reações pequenas e muito pouco pronunciadas entre 150 °C e 300 °C, aproximadamente – e podem ser relacionadas à diminuição dos produtos de hidratação do cimento CP III, que nessa argamassa foi menor (em relação a T5);
- Pico III – intensidade máxima entre 350 °C e 400 °C, aproximadamente – destaca-se na argamassa T15 e caberia ser caracterizado. É nitidamente constante e não variou em função da idade e da ciclagem das argamassas;
- Pico IV – intensidade máxima entre 425 °C e 475 °C, aproximadamente – esse pico acontece em função do uso da cal nessa argamassa e pode representar a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2);

- Pico V – intensidade máxima entre 775 °C e 825 °C, aproximadamente – decomposição de carbonatos. Esse pico aumentou bastante de intensidade entre 63 e 91 dias e praticamente manteve-se constante até 175 dias.

Figura 7.32 – Curvas TG e DTG – Argamassa T11.

Figura 7.33 – Curvas TG e DTG – Argamassa T12.

Figura 7.34 – Curvas TG e DTG – Argamassa T13.

Figura 7.35 – Curvas TG e DTG – Argamassa T14.

Figura 7.36 – Curvas TG e DTG – Argamassa T15.

7.7.4 Grupo G12F – Argamassas T16 a T20

As curvas DTG das argamassas com agregado reciclado deste grupo (T16 a T20), estão mostradas na Figura 7.37 até a Figura 7.40 e apresentam 8 picos em comum. Neste trabalho, cabe destacar os 2 seguintes:

- Pico I – intensidade máxima entre 100 °C e 150 °C, aproximadamente – esse pico pode corresponder a desidratação de C-S-H, gipsita e sulfoaluminatos;
- Pico II – intensidade máxima entre 150 °C e 200 °C, aproximadamente – esse pico é mais nítido apenas para as argamassas não cicladas de T11, T13 e T14 (63 dias e 175 dias – NC) e precisaria ser melhor investigado.

Os outros demais picos de DTG que precisariam ser ainda mais investigados³⁶ por técnicas complementares (DRX e ATG) são os seguintes:

- Pico III – intensidade máxima entre 250 °C e 325 °C, aproximadamente;
- Pico IV – intensidade máxima entre 375 °C e 450 °C, aproximadamente – diferenciam-se as curvas de T16 e T17 para as argamassas cicladas (curvas azuis);
- Pico V – intensidade máxima entre 450 °C e 525 °C, aproximadamente – esse pico acontece em função do uso da cal nessas argamassas e pode representar a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Apresenta maior intensidade nas argamassas T16, T17 e T18;
- Pico VI – intensidade máxima entre 650 °C e 750 °C, aproximadamente – esse pico é da faixa de carbonatos e foi nitidamente mais pronunciado para as quatro argamassas cicladas e aos 175 dias de idade (nas argamassas T18 e T19 isto ocorre de forma ordenada em relação à evolução dos ciclos);

---

³⁶ Argilominerais do tijolo maciço usado nas alvenarias geradoras dos agregados reciclados (o processo de fabricação de cerâmica é artesanal, na região de Socorro – SP) e / ou de produtos da hidratação do cimento CP III.

- Pico VII – intensidade máxima entre 750 °C e 850 °C, aproximadamente – esse pico também é da faixa de carbonatos e teve intensidade bem menor nas argamassas T18 e T19;
- Pico VIII – intensidade máxima entre 825 °C e 900 °C, aproximadamente – corresponde a faixa de carbonatos e foi bem diferenciado para a argamassa T16 na condição de ciclagem e aos 175 dias. Ocorreu nas outras três argamassas com menos intensidade e alguma perturbação acima de 900 °C.

A curva DTG da argamassas com areia normal deste grupo (T15) é mostrada na Figura 7.36 e foi analisada separadamente pois essa argamassa contém cal hidratada na sua composição e areia quartzosa, ao invés de agregado reciclado:

- Pico I – intensidade máxima entre 100 °C e 150 °C, aproximadamente – esse pico corresponde ao C-S-H, gipsita e aos sulfoaluminatos;
- Pico II e outras reações pequenas e muito pouco pronunciadas entre 150 °C e 300 °C, aproximadamente – e podem ser relacionadas à diminuição dos produtos de hidratação do cimento, que nessa argamassa foi também baixo;
- Pico III – intensidade máxima entre 350 °C e 400 °C, aproximadamente – destaca-se na argamassa T15 e caberia ser caracterizado. É nitidamente constante e não variou em função da idade e da ciclagem das argamassas (o mesmo ocorreu para as argamassas com o outro cimento e então possivelmente decorre da cal hidratada usada na produção dessas argamassas, sendo mais provável a desidratação de hidróxido de magnésio);
- Pico IV – intensidade máxima entre 425 °C e 525 °C, aproximadamente – esse pico acontece em função do uso da cal nessa argamassa e pode representar a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2);
- Pico V – intensidade máxima entre 775 °C e 850 °C, aproximadamente – decomposição de carbonatos. Esse pico aumentou muito de intensidade entre 63 e 91 dias e reduziu de intensidade a 175 dias, para as duas condições de cura.

7.7.5 Características da termogravimetria

A termogravimetria dos materiais principais deste estudo (gesso de contaminação, agregados reciclados e aglomerantes) e das argamassas foi realizada por um único operador e no equipamento do Laboratório de Microestrutura do PCC.USP, com as seguintes características:

- Equipamento: NETZCHSTA 409 PC/PG;
- Taxa de aquecimento 10 °C / min;
- Cadinho: alumina;
- Massa da mostra: ± 1 g.

Figura 7.37 – Curvas TG e DTG – Argamassa T16.

Figura 7.38 – Curvas TG e DTG – Argamassa T17.

Figura 7.39 – Curvas TG e DTG – Argamassa T18.

Figura 7.40 – Curvas TG e DTG – Argamassa T19.

Figura 7.41 – Curvas TG e DTG – Argamassa T20.

7.8 Resultados individuais de resistência mecânica das argamassas

Tabela 7.9.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 63 dias de idade.

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo Estático	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
	1,4			2,2	1,4	7,6			9,9	7,6	-			-	-	5,8			2,1	5,8
T1	1,2	1,4	0,3	19,3	1,2	4,3	6,9	1,6	37,5	-	4,9	5,0	0,1	1,0	4,9	5,4	5,7	0,3	5,7	5,4
	1,7			21,6	1,7	6,2			9,9	6,2	5,0			1,0	5,0	5,9			3,6	5,9
	1,3			15,9	1,3	5,0			9,9	5,0	4,4			7,4	4,4	5,7			3,8	5,7
T2	1,7	1,5	0,2	11,8	1,7	5,9	5,5	0,5	6,0	5,9	-	4,8	0,5	-	-	5,9	5,9	0,2	0,5	5,9
	1,6			4,1	1,6	5,7			3,9	5,7	5,1			7,4	5,1	6,2			4,4	6,2
	1,9			10,0	1,9	7,6			0,0	7,6	4,9			-	-	6,8			7,3	6,8
T3	1,7	1,7	0,2	2,6	1,7	-	7,6	-	-	-	5,6	5,2	0,4	7,7	5,6	6,2	6,3	0,4	1,8	6,2
	1,5			12,7	1,5	-			-	-	5,1			1,9	5,1	6,0			5,6	6,0
	1,6			11,1	1,6	4,8			6,4	4,8	-			-	-	5,5			3,2	5,5
T4	1,3	1,4	0,2	10,8	1,3	5,0	5,1	0,4	2,8	5,0	4,3	4,5	0,3	4,4	4,3	5,6	5,6	0,2	1,0	5,6
	1,4			0,3	1,4	5,6			9,2	5,6	4,7			4,4	4,7	5,9			4,2	5,9
	1,7			4,1	1,7	10,4			6,0	10,4	8,6			2,8	8,6	14,1			8,3	14,1
T5	1,9	1,6	0,3	16,7	1,9	11,7	11,0	0,7	5,9	11,7	9,1	8,9	0,4	2,8	9,1	16,5	15,4	1,2	7,1	16,5
	1,3			20,8	1,3	11,0			0,0	11,0	-			-	-	15,6			1,2	15,6
	1,5			0,2	1,5	5,2			4,9	5,2	3,6			0,9	3,6	5,1			1,4	5,1
T6	1,5	1,5	0,1	4,2	1,5	5,6	5,5	0,2	2,4	5,6	3,4	3,6	0,2	4,7	3,4	5,2	5,1	0,1	0,8	5,2
	1,4			4,4	1,4	5,6			2,4	5,6	3,7			3,7	3,7	5,2			0,6	5,2
	1,5			9,0	1,5	5,9			2,9	5,9	4,1			7,5	4,1	5,9			3,7	5,9
T7	1,2	1,3	0,1	7,0	1,2	5,5	5,7	0,2	4,1	5,5	5,2	4,4	0,7	17,3	-	5,4	5,7	0,3	4,9	5,4
	1,3			2,0	1,3	5,8			1,2	5,8	4,0			9,8	4,0	5,8			1,2	5,8
	0,9			6,5	0,9	4,1			10,4	-	3,3			1,5	3,3	4,7			7,2	4,7
T8	1,0	1,0	0,1	0,3	1,0	4,6	4,5	0,5	0,4	4,6	3,2	3,3	0,1	1,5	3,2	5,3	5,1	0,3	2,8	5,3
	1,0			6,2	1,0	5,0			10,0	5,0	-			-	-	5,3			4,4	5,3
	0,9			3,9	0,9	5,1			11,3	-	-			-	-	4,7			3,9	4,7
T9	1,0	1,0	0,0	1,6	1,0	4,4	4,6	0,5	4,7	4,4	3,5	3,3	0,4	7,7	3,5	4,9	4,9	0,2	0,2	4,9

	1,0			2,3	1,0	4,3			6,6	4,3	3,0			7,7	3,0	5,1			3,7	5,1

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo Estático	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
	0,8			7,7	0,8	5,2			4,3	5,2	4,0			8,4	4,0	5,4			6,6	5,4
T10	0,8	0,9	0,1	7,7	0,8	5,6	5,4	0,2	3,1	5,6	5,8	5,4	0,6	8,4	5,8	4,4	5,1	0,6	13,4	-
	1,0			15,4	1,0	5,5			1,2	5,5	-			-	-	5,4			6,7	5,4
	1,8			12,8	1,8	7,7			10,1	-	4,7			5,2	4,7	5,4			2,7	5,4
T11	1,8	1,6	0,3	7,9	1,8	6,8	7,0	0,6	2,2	6,8	3,9	4,5	0,5	12,7	-	5,3	5,3	0,1	0,8	5,3
	1,3			20,7	1,3	6,4			8,0	6,4	4,8			7,5	4,8	5,2			1,9	5,2
	2,2			6,1	2,2	7,7			8,0	7,7	5,0			6,0	5,0	6,0			4,4	6,0
T12	2,2	2,0	0,2	7,9	2,2	8,9	8,4	0,7	6,1	8,9	4,9	5,6	0,6	12,0	-	5,9	6,3	0,6	6,0	5,9
	1,8			14,1	1,8	8,7			2,7	8,7	5,9			6,0	5,9	6,9			10,5	-
	1,3			13,0	1,3	7,0			7,6	7,0	4,7			7,8	4,7	6,2			3,0	6,2
T13	1,8	1,5	0,3	24,5	1,8	6,9	7,3	0,5	6,2	6,9	5,5	5,1	0,6	7,8	5,5	6,1	6,0	0,2	1,1	6,1
	1,3			11,5	1,3	7,2			1,4	7,2	-			-	-	5,8			4,1	5,8
	1,8			1,7	1,8	7,5			4,6	7,5	4,8			7,7	4,8	6,4			1,7	6,4
T14	1,8	1,9	0,0	1,3	1,8	6,9	7,2	0,3	3,1	6,9	-	5,2	0,6	-	-	6,9	6,5	0,3	5,0	6,9
	1,9			3,0	1,9	7,1			1,5	7,1	5,6			7,7	5,6	6,3			3,3	6,3
	0,0			5,3	0,0	4,2			3,1	4,2	4,1			10,2	-	4,4			5,0	4,4
T15	-	1,0	0,1	-	-	4,4	4,3	0,1	1,5	4,4	4,7	4,6	0,4	2,9	4,7	4,9	4,7	0,4	5,9	4,9
	1,0			5,3	1,0	4,4			1,5	4,4	4,9			7,3	4,9	-			-	-
	1,6			13,1	1,6	4,7			36,0	-	6,3			0,6	6,3	5,0			2,2	5,0
T16	1,8	1,8	0,2	1,8	1,8	6,8	7,3	1,6	7,8	6,8	5,2	5,8	0,8	9,6	5,2	5,1	5,8	0,6	11,5	-
	2,0			11,3	2,0	7,9			7,8	7,9	-			-	-	6,3			9,3	6,3
	1,0			3,3	1,0	8,0			0,1	8,0	5,3			1,0	5,3	6,2			0,1	6,2
T17	2,0	2,0	0,1	0,4	2,0	8,5	8,0	0,5	5,8	8,5	4,7	5,2	0,5	9,6	4,7	6,2	6,2	0,0	0,6	6,2
	2,1			3,7	2,1	7,5			5,9	7,5	5,6			7,7	5,6	6,3			0,7	6,3
	-			-	-	0,2			4,8	0,2	-			-	-	6,7			0,1	6,7
T18	-	2,3	-	-	-	10,2	9,7	1,1	4,8	10,2	5,8	5,8	-	0,0	5,8	6,6	6,7	0,1	1,1	6,6
	2,3			0,0	2,3	7,9			18,6	-	-			-	-	6,8			1,1	6,8
	1,0			14,8	1,0	7,5			3,5	7,5	-			-	-	7,0			1,0	7,0
T19	2,1	2,2	0,4	5,0	2,1	7,3	7,3	0,3	0,6	7,3	7,8	7,9	0,1	0,6	7,8	6,9	6,9	0,2	0,7	6,9
	2,6			19,8	2,6	7,0			4,1	7,0	7,9			0,6	7,9	6,7			2,6	6,7
	0,7			4,5	0,7	2,7			10,0	2,7	-			-	-	3,5			11,2	-
T20	0,8	0,7	0,1	9,1	0,8	3,3	3,0	0,3	10,0	3,3	2,5	2,7	0,3	7,4	2,5	4,3	3,9	0,4	9,5	4,3
	0,7			4,5	0,7	3,0			0,0	3,0	2,9			7,4	2,9	4,0			1,7	4,0

Tabela 7.10.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 91 dias de idade.

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo Estático	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
T1	1,2			28,0	1,2	7,8			7,0	7,8	3,6			6,0	3,6	6,3			-	-
	1,8	1,7	0,4	6,5	1,8	9,0	8,4	0,6	6,4	9,0	3,2	3,4	0,3	6,0	3,2	7,9	7,5	1,0	5,5	7,9
	2,1			21,6	2,1	8,5			0,6	8,5	-			-	-	8,2			10,0	8,2
T2	1,6			6,2	1,6	8,1			8,6	8,1	5,5			2,5	5,5	7,8			2,8	7,8
	1,7	1,7	0,1	4,4	1,7	8,2	8,9	1,3	7,6	8,2	5,8	5,7	0,2	2,5	5,8	7,9	8,1	0,3	1,9	7,9
	1,7			1,8	1,7	10,3			16,2	-	-			-	-	8,4			4,7	8,4
T3	1,7			12,3	1,7	8,3			12,1	-	5,7			5,9	5,7	8,9			0,3	8,9
	2,2	2,0	0,2	9,7	2,2	9,9	9,4	1,0	4,6	9,9	6,1	6,1	0,3	0,4	6,1	8,8	8,9	0,0	0,2	8,8
	2,0			2,6	2,0	10,1			7,5	10,1	6,4			5,4	6,4	8,9			0,1	8,9
T4	1,5			11,7	1,5	8,7			9,2	8,7	-			-	-	8,1			9,9	8,1
	1,2	1,3	0,1	7,5	1,2	7,2	7,9	1,0	9,2	7,2	3,6	3,7	0,1	1,0	3,6	7,0	7,4	0,6	4,8	7,0
	1,3			4,2	1,3	-			-	-	3,7			1,0	3,7	7,0			5,0	7,0
T5	2,0			0,4	2,0	12,9			0,1	12,9	10,1			3,0	10,1	16,1			4,5	16,1
	1,8	2,0	0,1	7,1	1,8	12,7	12,9	0,3	2,0	12,7	-	10,4	0,4	-	-	16,3	16,8	1,2	3,4	16,3
	2,1			7,5	2,1	13,2			2,1	13,2	10,7			3,0	10,7	18,2			7,9	18,2
T6	1,4			6,7	1,4	6,4			6,8	6,4	3,6			9,2	3,6	5,8			1,9	5,8
	1,5	1,5	0,1	0,0	1,5	7,4	6,9	0,5	7,8	7,4	3,8	4,0	0,5	4,2	3,8	6,1	5,9	0,1	2,4	6,1
	1,6			6,7	1,6	6,8			1,0	6,8	4,5			13,4	-	5,9			0,5	5,9
T7	1,2			7,7	1,2	-			-	-	-			-	-	6,0			1,9	6,0
	1,5	1,3	0,2	15,4	1,5	6,6	6,9	0,4	4,3	6,6	4,0	4,0	-!	0,0	4,0	6,3	6,1	0,2	3,5	6,3
	1,2			7,7	1,2	7,2			4,3	7,2	-			-	-	6,0			1,6	6,0
T8	1,2			5,9	1,2	5,2			0,0	5,2	4,6			5,7	4,6	6,2			4,9	6,2
	1,1	1,1	0,1	2,9	1,1	5,2	5,2	0,0	0,0	5,2	-	4,4	0,4	-	-	5,8	5,9	0,2	2,5	5,8
	1,1			2,9	1,1	5,2			0,0	5,2	4,1			5,7	4,1	5,8			2,4	5,8
T9	1,2			2,9	1,2	5,4			2,4	5,4	-			-	-	5,7			2,8	5,7
	1,2	1,2	0,1	2,9	1,2	5,8	5,5	0,2	4,8	5,8	2,7	2,9	0,3	6,9	2,7	5,9	5,8	0,1	0,6	5,9
	1,1			5,7	1,1	5,4			2,4	5,4	3,1			6,9	3,1	6,0			2,2	6,0
T10	1,7			3,8	1,7	7,6			0,0	7,6	7,2			3,3	7,2	8,5			0,1	8,5
	1,8	1,8	0,1	1,9	1,8	7,4	7,6	0,2	2,6	7,4	7,4	7,0	0,6	6,2	7,4	8,8	8,5	0,3	3,8	8,8
	1,8			1,9	1,8	7,8			2,6	7,8	6,3			9,6	6,3	8,1			3,9	8,1

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo Estático	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
	1,8			1,9	1,8	9,5			8,0	9,5	-			-	-	6,4			1,4	6,4
T11	1,6	1,8	0,2	9,4	1,6	-	8,8	1,0	-	-	5,5	5,4	0,2	2,8	5,5	5,9	6,3	0,3	6,0	5,9
	1,9			7,5	1,9	8,1			8,0	8,1	5,2			2,8	5,2	6,6			4,7	6,6
	2,5			4,2	2,5	10,8			10,2	-	6,0			9,1	6,0	7,7			5,4	7,7
T12	2,5	2,4	0,2	4,2	2,5	9,3	9,8	0,9	5,1	9,3	4,6	5,5	0,8	16,4	-	7,6	7,3	0,6	3,8	7,6
	2,2			8,3	2,2	9,3			5,1	9,3	5,9			7,3	5,9	6,6			9,3	6,6
	1,9			11,8	1,9	7,5			7,4	7,5	4,6			7,8	4,6	6,9			1,8	6,9
T13	1,6	1,7	0,2	5,9	1,6	7,5	8,1	1,0	7,4	7,5	4,5	4,3	0,5	5,5	4,5	6,9	6,8	0,2	1,0	6,9
	1,6			5,9	1,6	9,3			14,8	-	3,7			13,3	-	6,6			2,8	6,6
	1,5			22,4	1,5	-			-	-	4,9			8,1	4,9	7,2			4,0	7,2
T14	2,0	1,9	0,4	3,4	2,0	8,4	8,7	0,4	2,9	8,4	6,2	5,3	0,8	16,3	-	7,3	7,5	0,5	3,0	7,3
	2,3			19,0	2,3	8,9			2,9	8,9	4,9			8,1	4,9	8,0			7,1	8,0
	1,5			2,2	1,5	5,6			3,1	5,6	6,1			6,1	6,1	9,7			2,5	9,7
T15	1,6	1,5	0,1	4,3	1,6	5,2	5,4	0,2	4,3	5,2	5,4	5,8	0,5	6,1	5,4	10,0	9,9	0,2	1,0	10,0
	1,5			2,2	1,5	5,5			1,2	5,5	-			-	-	10,1			1,5	10,1
	1,7			3,8	1,7	-			-	-	5,8			1,1	5,8	6,8			7,4	6,8
T16	1,7	1,8	0,1	3,8	1,7	7,0	7,5	0,6	6,0	7,0	5,9	5,9	0,1	0,6	5,9	6,3	6,3	0,5	0,0	6,3
	1,9			7,5	1,9	7,9			6,0	7,9	5,9			0,6	5,9	5,9			7,3	5,9
	1,8			5,9	1,8	11,0			3,8	11,0	6,9			10,7	-	6,7			2,7	6,7
T17	2,1	1,7	0,5	23,5	2,1	10,3	10,6	0,4	2,8	10,3	6,0	6,2	0,6	3,7	6,0	6,9	6,9	0,2	0,7	6,9
	1,2			29,4	1,2	10,5			0,9	10,5	5,8			7,0	5,8	7,0			2,1	7,0
	2,5			1,4	2,5	9,8			1,7	9,8	6,7			3,6	6,7	7,5			3,5	7,5
T18	2,3	2,5	0,2	6,8	2,3	8,8	9,6	0,8	8,7	8,8	-	7,0	0,4	-!	-	7,7	7,8	0,3	0,9	7,7
	2,6			5,4	2,6	10,3			6,9	10,3	7,2			3,6	7,2	8,1			4,3	8,1
	2,2			3,1	2,2	8,1			2,0	8,1	6,1			3,4	6,1	6,4			5,6	6,4
T19	2,3	2,1	0,2	7,8	2,3	8,8	8,3	0,5	6,5	8,8	5,7	5,9	0,3	3,4	5,7	7,1	6,8	0,3	3,4	7,1
	1,9			10,9	1,9	7,9			4,4	7,9	-				-	7,0			2,2	7,0
	0,9			10,0	0,9	2,9			6,5	2,9	4,1			2,4	4,1	4,6			5,1	4,6
T20	1,1	1,0	0,1	10,0	1,1	3,2	3,1	0,2	3,2	3,2	4,2	4,2	0,1	0,0	4,2	4,9	4,8	0,2	2,6	4,9
	1,0			0,0	1,0	3,2			3,2	3,2	4,3			2,4	4,3	4,9			2,5	4,9

Tabela 7.11.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 119 dias de idade.

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
T1	1,7			3,8	1,7	9,1			0,0	9,1	7,0			7,9	7,0
	1,8	1,8	0,1	1,9	1,8	9,7	9,1	0,6	6,6	9,7	6,0	6,5	0,5	8,5	6,0
	1,8			1,9	1,8	8,5			6,6	8,5	6,6			0,6	6,6
T2	1,9			1,7	1,9	7,9			9,2	7,9	5,1			1,8	5,1
	1,9	1,9	0,1	1,7	1,9	9,3	8,7	0,7	6,9	9,3	5,2	5,2	0,1	0,6	5,2
	2,0			3,4	2,0	8,9			2,3	8,9	5,3			1,2	5,3
T3	2,0			22,4	2,0	-			-	-	5,6			8,1	5,6
	1,2	1,6	0,4	26,5	1,2	7,9	8,2	0,4	3,7	7,9	6,0	6,1	0,5	1,0	6,0
	1,7			4,1	1,7	8,5			3,7	8,5	6,6			9,0	6,6
T4	1,2			12,2	1,2	-			-	-	6,2			1,2	6,2
	1,5	1,4	0,2	9,8	1,5	8,4	8,2	0,4	3,1	8,4	6,3	6,2	0,1	1,5	6,3
	1,4			2,4	1,4	7,9			3,1	7,9	6,0			2,7	6,0
T5	2,5			2,6	2,5	14,9			1,8	14,9	11,9			5,2	11,9
	2,6	2,6	0,1	1,3	2,6	14,9	14,6	0,5	1,8	14,9	12,6	12,5	0,6	0,6	12,6
	2,6			1,3	2,6	14,1			3,6	14,1	13,1			4,6	13,1
T6	1,5			4,3	1,5	8,1			14,1	-	6,2			1,7	6,2
	1,4	1,6	0,2	10,6	1,4	6,4	7,1	0,9	9,9	6,4	6,2	6,1	0,2	1,3	6,2
	1,8			14,9	1,8	6,8			4,2	6,8	5,9			3,0	5,9
T7	1,1			5,7	1,1	6,2			6,1	6,2	6,2			2,9	6,2
	1,2	1,2	0,1	2,9	1,2	6,7	6,6	0,4	1,5	6,7	6,7	6,4	0,3	4,9	6,7
	1,2			2,9	1,2	6,9			4,5	6,9	6,3			1,9	6,3
T8	1,2			9,1	1,2	5,1			2,5	5,1	6,0			7,0	6,0
	1,0	1,1	0,1	9,1	1,0	5,2	5,2	0,2	0,6	5,2	6,5	6,5	0,5	0,0	6,5
	1,1			0,0	1,1	5,4			3,2	5,4	6,9			7,0	6,9
T9	1,0			11,1	1,0	6,0			5,9	6,0	6,6			6,4	6,6
	0,8	0,9	0,1	11,1	0,8	5,3	5,7	0,4	6,5	5,3	5,5	6,2	0,6	-	-
	0,9			0,0	0,9	5,7			0,6	5,7	6,5			4,8	6,5
T10	1,8			20,0	1,8	9,5			1,8	9,5	8,3			0,2	8,3
	1,5	1,5	0,3	0,0	1,5	9,1	9,3	0,2	2,5	9,1	8,5	8,3	0,2	2,2	8,5
	1,2			20,0	1,2	9,4			0,7	9,4	8,1			2,4	8,1

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
T11	2,2			8,2	2,2	-			-	-	6,4			1,0	6,4
	2,2	2,0	0,3	8,2	2,2	6,4	6,6	0,3	3,0	6,4	6,4	6,4	0,1	0,5	6,4
	1,7			16,4	1,7	6,8			3,0	6,8	6,3			1,5	6,3
T12	2,2			3,1	2,2	6,2			6,1	6,2	7,3			0,4	7,3
	2,2	2,1	0,1	3,1	2,2	6,7	6,6	0,4	1,5	6,7	7,2	7,3	0,1	1,2	7,2
	2,0			6,3	2,0	6,9			4,5	6,9	7,4			0,8	7,4
T13	1,5			11,8	1,5	5,1			1,9	5,1	7,4			6,0	7,4
	1,9	1,7	0,3	11,8	1,9	5,1	5,2	0,2	1,9	5,1	6,7	7,0	0,4	4,4	6,7
	-			-	-	5,4			3,8	5,4	6,9			1,6	6,9
T14	1,9			29,5	1,9	5,9			4,7	5,9	6,9			0,0	6,9
	1,9	1,5	0,8	29,5	1,9	5,3	5,6	0,3	5,9	5,3	7,2	6,9	0,3	4,4	7,2
	0,6				-	5,7			1,2	5,7	6,6			4,5	6,6
T15	1,5			21,6	1,5	6,0			1,6	6,0	9,7			5,5	9,7
	1,0	1,2	0,3	18,9	1,0	6,1	6,1	0,1	0,0	6,1	8,6	9,2	0,6	6,8	8,6
	1,2			2,7	1,2	6,2			1,6	6,2	9,4			1,4	9,4
T16	2,1			0,0	2,1	8,1			9,0	8,1	6,4			0,4	6,4
	2,7	2,1	0,6	28,6	2,7	9,7	8,9	0,8	9,0	9,7	6,3	6,4	0,1	1,3	6,3
	1,5			28,6	1,5	8,9			0,0	8,9	6,5			0,9	6,5
T17	2,5			8,7	2,5	10,4			3,7	10,4	6,8			0,4	6,8
	2,3	2,3	0,2	0,0	2,3	10,1	10,0	0,4	0,7	10,1	6,9	6,7	0,2	2,7	6,9
	2,1			8,7	2,1	9,6			4,3	9,6	6,5			3,1	6,5
T18	2,1			4,5	2,1	8,5			0,8	8,5	7,8			7,1	7,8
	2,1	2,2	0,2	4,5	2,1	8,2	8,4	0,2	2,8	8,2	7,1	7,3	0,5	2,2	7,1
	2,4			9,1	2,4	8,6			2,0	8,6	6,9			5,0	6,9
T19	2,0			11,8	2,0	6,8			-	-	7,5			2,7	7,5
	2,6	2,3	0,3	14,7	2,6	8,6	7,9	1,0	8,9	8,6	7,3	7,3	0,2	0,8	7,3
	2,2			2,9	2,2	8,3			5,1	8,3	7,2			1,9	7,2
T20	0,9			6,9	0,9	3,8			0,0	3,8	11,1			4,4	11,1
	1,0	1,0	0,1	3,4	1,0	3,9	3,8	0,1	2,6	3,9	10,4	10,6	0,4	2,3	10,4
	1,0			3,4	1,0	3,7			2,6	3,7	10,4			2,1	10,4

Tabela 7.12.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 175 dias de idade.

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo Estático	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
	1,1			15,4	1,1	-			-	-	5,6			6,7	5,6	6,7			7,1	6,7
T1	1,2	1,3	0,3	7,7	1,2	9,3	9,8	0,7	5,1	9,3	6,2	6,0	0,3	3,3	6,2	7,4	7,2	0,4	3,1	7,4
	1,6			23,1	1,6	10,3			5,1	10,3	6,2			3,3	6,2	7,5			4,0	7,5
	1,2			0,0	1,2	7,0			9,9	7,0	5,4			6,9	5,4	7,7			1,1	7,7
T2	1,2	1,2	0,0	0,0	1,2	8,5	7,8	0,8	9,4	8,5	4,7	5,1	0,5	6,9	4,7	7,5	7,6	0,1	2,0	7,5
	1,2			0,0	1,2	7,8			0,4	7,8	-			-	-	7,7			0,9	7,7
	1,2			7,7	1,2	7,0			5,4	7,0	-			-	-	9,0			1,3	9,0
T3	1,3	1,3	0,1	0,0	1,3	6,7	7,4	1,0	9,5	6,7	5,2	5,2	0,0	0,0	5,2	9,2	9,1	0,1	0,9	9,2
	1,4			7,7	1,4	8,5			14,9	-	5,2			0,0	5,2	9,2			0,5	9,2
	0,8			20,0	0,8	6,5			0,5	6,5	5,4			4,5	5,4	7,2			0,4	7,2
T4	1,0	1,0	0,2	0,0	1,0	6,4	6,5	0,2	2,0	6,4	5,6	5,2	0,6	8,4	5,6	7,0	7,2	0,2	3,2	7,0
	1,2			20,0	1,2	6,7			2,6	6,7	4,5			12,9	-	7,4			2,8	7,4
	2,0			18,4	2,0	15,4			3,5	15,4	16,6			0,0	16,6	12,9			6,1	12,9
T5	2,9	2,5	0,6	18,4	2,9	16,8	16,0	0,7	5,2	16,8	-	16,6	-	-	-	-	13,7	1,2	-	-
	-			-	-	15,7			1,7	15,7	-			-	-	14,6			6,1	14,6
	1,1			2,9	1,1	6,2			2,8	6,2	4,2			0,0	4,2	6,7			2,1	6,7
T6	1,2	1,1	0,1	5,9	1,2	6,0	6,0	0,2	0,6	6,0	-	4,2	-	-	-	6,7	6,6	0,2	1,5	6,7
	1,1			2,9	1,1	5,9			2,2	5,9	-			-	-	6,4			3,6	6,4
	0,8			17,2	0,8	5,4			8,0	5,4	6,1			9,6	6,1	4,9			2,4	4,9
T7	1,0	1,0	0,2	3,4	1,0	6,5	5,9	0,6	10,8	-	7,4	6,8	0,9	9,6	7,4	4,8	4,8	0,1	0,3	4,8
	1,1			13,8	1,1	5,7			2,8	5,7	-			-	-	4,7			2,7	4,7
	0,9			0,0	0,9	4,3			3,2	4,3	4,5			9,8	4,5	6,5			4,1	6,5
T8	0,9	0,9	0,0	0,0	0,9	4,4	4,2	0,3	5,6	4,4	4,1	4,1	0,4	0,0	4,1	6,2	6,2	0,2	0,6	6,2
	0,9			0,0	0,9	3,8			8,8	3,8	3,7			9,8	3,7	6,0			3,5	6,0
	0,7			4,5	0,7	4,5			6,3	4,5	2,7			1,2	2,7	6,5			7,0	6,5
T9	0,7	0,7	0,1	4,5	0,7	4,2	4,2	0,3	0,8	4,2	2,8	2,7	0,1	2,4	2,8	5,8	6,1	0,4	4,7	5,8
	0,8			9,1	0,8	4,0			5,5	4,0	2,7			1,2	2,7	5,9			2,3	5,9
	1,7			6,3	1,7	11,1			0,9	11,1	10,2			0,0	10,2	6,9			4,9	6,9
T10	1,7	1,6	0,2	6,3	1,7	11,0	11,0	0,1	0,0	11,0	-	10,2	0,0	-	-	6,1	6,6	0,4	6,9	6,1
	1,4			12,5	1,4	10,9			0,9	10,9	10,2			0,0	10,2	6,7			2,0	6,7

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo Estático	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
	1,4			16,7	1,4	-			-	-	5,5			0,0	5,5	5,3			10,5	-
T11	1,1	1,2	0,2	8,3	1,1	7,1	6,7	0,6	6,0	7,1	-	5,5	-	-	-	6,4	5,9	0,6	8,9	6,4
	1,1			8,3	1,1	6,3			6,0	6,3	-					6,0			1,7	6,0
	1,4			17,6	1,4	-			-	-	4,5			0,0	4,5	6,7			0,0	6,7
T12	1,8	1,7	0,3	5,9	1,8	9,0	9,4	0,5	3,7	9,0	4,5	4,5	0,0	0,0	4,5	6,9	6,7	0,2	3,2	6,9
	1,9			11,8	1,9	9,7			3,7	9,7	-			-	-	6,5			3,1	6,5
	1,3			8,3	1,3	7,3			0,0	7,3	5,6			0,0	5,6	6,6			0,1	6,6
T13	-	1,2	0,1	-	-	7,0	7,3	0,3	4,1	7,0	-	5,6	-	-	-	6,6	6,6	0,0	0,7	6,6
	1,1			8,3	1,1	7,6			4,1	7,6	-			-	-	6,7			0,5	6,7
	1,5			2,2	1,5	7,1			8,2	7,1	4,6			5,7	4,6	7,1			1,7	7,1
T14	1,8	1,5	0,3	17,4	1,8	8,3	7,7	0,6	7,3	8,3	4,1	4,4	0,4	5,7	4,1	7,1	7,0	0,2	1,5	7,1
	1,3			15,2	1,3	7,8			0,9	7,8	-			-	-	6,8			3,3	6,8
	1,9			11,8	1,9	7,3			0,9	7,3	-			-	-	11,5			5,1	11,5
T15	1,4	1,7	0,3	17,6	1,4	7,1	7,4	0,3	3,6	7,1	9,2	9,8	0,8	6,1	9,2	10,5	11,0	0,5	4,5	10,5
	1,8			5,9	1,8	7,7			4,5	7,7	10,4			6,1	10,4	10,9			0,6	10,9
	-			-	-	7,1			2,7	7,1	3,7			0,0	3,7	6,9			9,2	6,9
T16	1,6	1,5	0,1	6,7	1,6	7,5	7,3	0,3	2,7	7,5	-	3,7	-	-	-	8,1	7,6	0,6	5,6	8,1
	1,4			6,7	1,4	-			-	-						7,9			3,6	7,9
	1,6			0,0	1,6	9,1			6,5	9,1	5,3			6,0	5,3	7,4			4,5	7,4
T17	1,6	1,6	0,0	0,0	1,6	10,9	9,7	1,0	12,0	-	-	5,0	0,4	-	-	7,9	7,8	0,3	1,2	7,9
	1,6			0,0	1,6	9,2			5,5	9,2	4,7			6,0	4,7	8,0			3,3	8,0
	1,7			2,0	1,7	8,7			4,4	8,7	3,9			6,0	3,9	8,3			4,1	8,3
T18	1,5	1,7	0,2	10,0	1,5	8,3	8,3	0,4	0,4	8,3	-	4,2	0,4	-	-	8,8	8,7	0,3	1,6	8,8
	1,8			8,0	1,8	8,0			4,0	8,0	4,4			6,0	4,4	8,9			2,4	8,9
	1,5			4,7	1,5	6,4			16,5	-	5,2			3,7	5,2	7,7			3,1	7,7
T19	1,4	1,4	0,1	2,3	1,4	8,3	7,7	1,1	8,3	8,3	5,6	5,4	0,3	3,7	5,6	7,9	8,0	0,3	0,2	7,9
	1,4			2,3	1,4	8,3			8,3	8,3	-			-	-	8,2			3,3	8,2
	1,0			3,4	1,0	4,1			2,4	4,1	4,3			8,9	4,3	6,1			2,4	6,1
T20	0,9	1,0	0,1	6,9	0,9	4,1	4,2	0,2	2,4	4,1	3,6	4,0	0,5	8,9	3,6	5,6	6,0	0,3	5,6	5,6
	1,0			3,4	1,0	4,4			4,8	4,4	-			-	-	6,1			3,1	6,1

Tabela 7.13.– Resultados individuais dos ensaios de resistência mecânica aos 175 dias de idade – não cicladas.

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo Estático	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
	-			-	-	-			-	-	-			-	-	-	-		-	-
T1	0,8	0,9	0,1	5,9	0,8	4,2	4,1	0,1	2,4	4,2	-	3,4	-	-	-	4,9	4,9	0,0	0,2	4,9
	0,9			5,9	0,9	4,0			2,4	4,0	3,4			0,0	3,4	4,9			0,2	4,9
	1,0			9,1	1,0	4,6			7,4	4,6	3,6			0,0	3,6	5,7			1,2	5,7
T2	1,1	1,1	0,1	0,0	1,1	5,0	5,0	0,4	0,7	5,0	-	3,6	-	-	-	5,8	5,8	0,1	0,2	5,8
	1,2			9,1	1,2	5,3			6,7	5,3	-			-	-	5,9			1,3	5,9
	0,9			7,8	0,9	5,4			2,7	5,4	3,6			6,1	3,6	5,8			4,5	5,8
T3	0,9	1,0	0,1	4,8	0,9	-	5,6	0,2	-	-	3,9	3,8	0,2	1,7	3,9	5,5	6,1	0,7	9,1	5,5
	1,1			12,6	1,1	5,7			2,7	5,7	4,0			4,3	4,0	6,9			13,6	-
	0,9			3,6	0,9	3,7			3,5	3,7	3,7			3,9	3,7	5,0			1,8	5,0
T4	1,0	0,9	0,1	7,1	1,0	3,8	3,8	0,2	0,9	3,8	4,0	3,9	0,2	3,9	4,0	4,9	4,9	0,1	1,1	4,9
	0,9			3,6	0,9	4,0			4,3	4,0	-			-	-	4,9			0,7	4,9
	2,3			21,1	2,3	10,7			2,2	10,7	-			-	-	-			-	-
T5	1,5	1,9	0,5	21,1	1,5	10,9	10,5	0,6	4,1	10,9	7,8	7,8	-	0,0	7,8	11,5	11,3	0,4	2,4	11,5
	1,5			21,1	1,5	9,8			6,4	9,8				100,0	-	11,0			2,4	11,0
	0,7			4,5	0,7	3,3			3,9	3,3	-			-	-	3,7			3,9	3,7
T6	0,7	0,7	0,1	4,5	0,7	3,5	3,4	0,1	1,9	3,5	5,4	5,3	0,1	1,9	5,4	4,1	3,8	0,3	8,6	4,1
	0,8			9,1	0,8	3,5			1,9	3,5	5,2			1,9	5,2	3,6			4,7	3,6
	0,7			5,8	0,7	3,0			12,6	-	-			-	-	3,8			6,9	3,8
T7	0,7	0,7	0,1	1,8	0,7	3,7	3,4	0,4	7,8	3,7	-	4,1	-	-	-	4,0	4,0	0,3	0,3	4,0
	0,8			7,6	0,8	3,6			4,9	3,6	4,1			0,0	4,1	4,3			7,2	4,3
	0,6			12,7	0,6	2,6			4,9	2,6	5,0			3,4	5,0	3,5			0,6	3,5
T8	0,6	0,6	0,1	14,5	0,6	2,8	2,7	0,1	2,4	2,8	4,3	4,8	0,5	11,0	-	3,5	3,5	0,0	0,6	3,5
	0,4			27,3	0,4	2,8			2,4	2,8	5,2			7,6	5,2	-			-	-
	0,6			6,0	0,6	2,6			2,5	2,6	4,7			0,0	4,7	3,5			5,6	3,5
T9	0,7	0,6	0,1	12,1	0,7	2,9	2,7	0,2	8,8	2,9	-	4,7	-	-	-	3,5	3,7	0,4	5,9	3,5
	0,6			6,0	0,6	2,5			6,2	2,5	-			-	-	4,2			11,5	-
	0,8			4,3	0,8	6,2			12,7	-	5,5			7,3	5,5	7,7			13,4	-
T10	0,6	0,8	0,2	21,7	0,6	5,3	5,5	0,6	3,6	5,3	6,0	5,9	0,4	1,1	6,0	6,2	6,8	0,8	8,3	6,2
	0,9			17,4	0,9	5,0			9,1	5,0	6,3			6,2	6,3	6,4			5,1	6,4

Argamassa	Tração na Flexão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Compressão	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo Estático	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo	Módulo dinâmico	Média	Desvio padrão	Variação com relação à média	CP's de acordo
T11	1,2			14,3	1,2	7,4			0,9	7,4	4,0			9,8	4,0	5,1			2,1	5,1
	1,4	1,4	0,2	0,0	1,4	6,9	7,3	0,4	5,9	6,9	4,8	4,4	0,4	8,3	4,8	5,1	5,2	0,2	2,0	5,1
	1,6			14,3	1,6	7,7			5,0	7,7	4,5			1,5	4,5	5,5			4,1	5,5
T12	1,5			12,5	1,5	8,5			9,9	8,5	5,6			4,5	5,6	5,8			0,0	5,8
	1,4	1,3	0,2	5,0	1,4	6,6	7,7	1,0	14,7	-	6,6	5,9	0,6	12,5	-	5,6	5,8	0,2	2,8	5,6
	1,1			17,5	1,1	8,1			4,7	8,1	5,4			8,0	5,4	5,9			2,8	5,9
T13	0,5			50,0	-	6,2			2,1	6,2	3,9			4,1	3,9	4,7			6,7	4,7
	1,2	1,0	0,4	20,0	1,2	6,6	6,3	0,2	4,2	6,6	4,3	4,1	0,2	5,7	4,3	5,0	5,0	0,3	0,2	5,0
	1,3			30,0	1,3	6,2			2,1	6,2	4,0			1,6	4,0	5,3			6,6	5,3
T14	1,3			0,0	1,3	6,3			0,0	6,3	-			-	-	5,8			1,8	5,8
	1,3	1,3	0,0	0,0	1,3	6,7	6,3	0,4	6,3	6,7	6,6	6,6	0,1	0,8	6,6	5,9	5,7	0,2	2,1	5,9
	1,3			0,0	1,3	5,9			6,3	5,9	6,5			0,8	6,5	5,5			3,9	5,5
T15	0,6			5,3	0,6	4,4			8,2	4,4	4,4			4,3	4,4	7,5			2,2	7,5
	0,6	0,6	0,1	5,3	0,6	4,0	4,1	0,3	1,6	4,0	4,8	4,6	0,3	4,3	4,8	7,5	7,3	0,3	3,1	7,5
	0,7			10,5	0,7	3,8			6,6	3,8	-			-	-	6,9			5,3	6,9
T16	1,6			11,6	1,6	6,7			6,9	6,7	4,5			2,3	4,5	6,1			7,7	6,1
	1,2	1,4	0,2	16,3	1,2	6,4	6,3	0,5	2,1	6,4	4,7	4,4	0,4	6,8	4,7	5,5	5,7	0,4	3,2	5,5
	1,5			4,7	1,5	5,7			9,0	5,7	4,0			9,1	4,0	5,4			4,6	5,4
T17	1,4			12,5	1,4	8,1			7,6	8,1	4,3			3,6	4,3	6,2			3,2	6,2
	1,7	1,6	0,2	6,3	1,7	8,7	8,8	0,7	0,8	8,7	-	4,2	0,2	-	-	6,5	6,4	0,2	1,3	6,5
	1,7			6,3	1,7	9,5			8,4	9,5	4,0			3,6	4,0	6,5			2,0	6,5
T18	1,7			10,9	1,7	6,8			5,1	6,8	4,2			-	-	6,5			1,0	6,5
	1,5	1,5	0,2	2,2	1,5	7,0	7,2	0,5	2,3	7,0	5,5	4,9	0,9	13,4	-	6,3	6,4	0,1	2,0	6,3
	1,4			8,7	1,4	7,7			7,4	7,7	-			-	-	6,5			1,0	6,5
T19	1,3			18,2	1,3	4,3			5,5	4,3	-			-	-	5,0			2,3	5,0
	1,0	1,1	0,2	9,1	1,0	4,8	4,6	0,4	5,5	4,8	3,9	3,8	0,1	2,6	3,9	5,3	5,1	0,2	3,7	5,3
	1,0			9,1	1,0	-			-	-	3,7			2,6	3,7	5,0			1,5	5,0
T20	0,6			0,0	0,6	2,7			3,6	2,7	-			-	-	4,4			5,7	4,4
	0,5	0,6	0,1	16,7	0,5	2,6	2,8	0,3	7,1	2,6	-	4,6	-	-	-	4,0	4,2	0,3	5,7	4,0
	0,7			16,7	0,7	3,1			-	-	4,6			0,0	4,6	-			-	-

7.9 Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples

(a) Argamassas com A1

(b) Argamassas com A2

(c) Argamassas com A3

(d) Argamassas com A4

Figura 7.42 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – 63 dias: (a) A1; (b) A2; (c) A3 e (d) A4.

(a) Argamassas com A1

(b) Argamassas com A2

(c) Argamassas com A3

(d) Argamassas com A4

Figura 7.43 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – 91 dias: (a) A1; (b) A2; (c) A3 e (d) A4.

(a) Argamassas com A1

(b) Argamassas com A2

(c) Argamassas com A3

(d) Argamassas com A4

Figura 7.44 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – 119 dias: (a) A1; (b) A2; (c) A3 e (d) A4.

(a) Argamassas com A1

(b) Argamassas com A2

(c) Argamassas com A3

(d) Argamassas com A4

Figura 7.45 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – 175dias: (a) A1; (b) A2; (c) A3 e (d) A4.

(a) 63 dias

(b) 91 dias

(c) 119 dias

(d) 175 dias

Figura 7.46 – Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão simples – AN: (a) 63; (b) 91; (c) 119 e (d) 175 dias.

7.10 Medidas de variação dimensional em corpos-de-prova de argamassas similares as deste estudo. (Shiroma, 2004)

Figura 7.47 – Estabilidade dimensional T2. (Shiroma, 2004)

Figura 7.48 – Estabilidade dimensional T3. (Shiroma, 2004)

Figura 7.49 – Estabilidade dimensional T4. (Shiroma, 2004)

Figura 7.50 – Estabilidade dimensional T6. (Shiroma, 2004)

Figura 7.51 – Estabilidade dimensional T7. (Shiroma, 2004)

Figura 7.52 – Estabilidade dimensional T8. (Shiroma, 2004)

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V. et al. **Alternativas para redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras**. São Paulo: FINEP ITQC Escola Politécnica da USP. 1998.

ALTHEMAN, D. **Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil**. 2002. Relatório Final (Iniciação Científica) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure) – ASTM C 349**. PA, 2002.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C. **Caracterização e controle de qualidade de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2004. 140p. Exame de Qualificação (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ANTUNES, R. P. N. **Estudo da influência da cal hidratada nas pastas de gesso**. 1999. 145p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

ARCHITECTURAL SERVICES DEPARTMENT. Hong Kong. **Particular specification for designed mix concrete with 20% recycled coarse aggregates**. Disponível em: <<http://www.archsd.gov.hk/english/reports/e378.pdf>>. Acesso em: 1 abr. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da composição granulométrica – NBR NM 248**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados em estado solto – determinação da massa unitária – NBR 7251**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis – NBR NM 50**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometros por lavagem – NBR NM 46**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – especificação – NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – procedimentos – NBR 15115**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de resíduos sólidos – NBR 10007**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido – NBR 13280**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado – NBR 13278**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimentos Portland de alto forno – NBR 5735**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimentos resistentes a sulfatos – NBR 5737**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos – NBR 10005**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos – NBR 10006**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira – NBR 7190**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto - procedimento – NBR 6118**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – classificação – NBR 10004**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – NBR 10008**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - aterros – diretrizes para projeto, implantação e operação – NBR 15113**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação – NBR 15114**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – áreas de transbordo e triagem – diretrizes para projeto, implantação e operação – NBR 15112**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION. **Granulats pour bétons hydrauliques - NF P 18 541**. France, 1994.

BATIC et al. Secondary ettringite formation in concrete subjected to different curing conditions. **Cement and Concrete Research**, v 30, p 1407-12, Jan 2000.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade da reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

CAMARINI, G. **Desempenho de misturas cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica**. 1995. 252p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

CAMPBELL, S. **Lead by Example**. 2003. Disponível em: http://www.wconline.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features_Item/0,3299,93761,00.html>. Acesso em: 1 abr. 2004.

CASSA, J.C.S.; CARNEIRO, A.P. ; BRUM, I.A.S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA, 2001. 311 p.

CINCOTTO, M.A. **Patologia das argamassas de revestimento - análise e recomendações**. São Paulo, IPT, 1983. (Monografias, 8 – Publicação n. 1252).

COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.25, p.401-407, Mai-Jul 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n.o. 307 de 05 de julho de 2002 – CONAMA** – Conselho Nacional do

Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 18 out. 2003.

CRESCENCIO, R. M. **Avaliação de desempenho do revestimento decorativo monocamada**. 2003. 169p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Ministério das Minas e Energia. **Sumário Mineral 2003**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/m_economia_sumario.htm>. Acesso em: 10 fev. 2004.

DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. **Aggregates for concrete and mortar - DIN 4226 - Part 100: Recycled aggregates**. Berlin, 2002.

DJANIKIAN, J. G. **Aspectos da hidratação do cimento portland em misturas com elevados teores de sulfato de cálcio**. 1987. 128p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1987.

ENTE NAZIONALI ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **Aggregates for use in concretes - definition, classification and properties – UNI 8520-1**. Milano, 1999.

FU, Y et al. A kinetic study of delayed ettringite formation in hydrated portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, v 25, p.63-70, Jan 1995.

FU, Y.; DING, J.; BEAUDOIN, J. J. Expansion of portland cement mortar due to internal sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v 27, p. 1299-1306, Sep 1997.

FUNDO DE GARANTIA POR TEMPO DE SERVIÇO. Ministério do Trabalho e Emprego. **Resolução n.º 297, de 21 de outubro de 1997 – Conselho Curador do FGTS**. Disponível em: <<http://www.mte.gov.br/Temas/FGTS/Legislacao>>. Acesso em: 19 out. 2003.

FUNDO DE GARANTIA POR TEMPO DE SERVIÇO. Ministério do Trabalho e Emprego. **Resolução n.º 396, de 24 de junho de 2002 – Conselho Curador do**

FGTS. Disponível em: <<http://www.mte.gov.br/Temas/FGTS/Legislacao>>. Acesso em: 19 out. 2003.

GALLIAS, J. L. Action of gypsum on recycled aggregate concrete. In: CIB WORLD BUILDING CONGRESS, [s.l.], 1998. **Proceedings: Materials And Technologies For Sustainable Construction.** Symposium A. [s.l.] CIB/RILEM, 1998. v.1, p.175-82.

GUIMARÃES, J.E.P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil.** São Paulo: PINI, 2002. 341p.

HAMASSAKI, L.T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M.C. Utilization of construction waste in rendering mortar. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND. - INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION. Dundee, 1996. **Proceedings.** Grã Bretanha, Ravindra & Thomas, 1996. p.115-20.

HIME, W. G.; MATHER, B. "Sulfate attack," or is it? **Cement and Concrete Research**, v.29, p.789-791, Mai 1999.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **ES – 5 – Especificação técnica.** 1981.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem.** 2002. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm>. Acesso em: 10 out. 2003

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Alternativas de gestão dos resíduos de gesso.** 2003. 9p. Disponível em: <www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acesso em: 11 jan. 2004.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Por que recomendamos a demolição. **A Construção São Paulo**, n. 2259, p. 3-8, ano 14, 27 de maio de 1991.

KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; AGGELI, M. B. Hydration products of C_3A , C_3S and Portland cement in the presence of $CaCO_3$. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.1073-77, 2000.

KUZEL, H. –J. Initial reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements. **Cement and Concrete Composites**, v.18, p.195-203, 1996.

KUZEL, H. –J.; PÖLMANN, H. Hydration of C_3A in the presence of $Ca(OH)_2$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ and $CaCO_3$. **Cement and Concrete Research**, v.21, p.885-95, 1991.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas e concretos**. 1997. 146p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1997.

LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em concretos e argamassas**. 1999. 204p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1999.

MAEDA, F. M. **Produtividade da mão-de-obra nos serviços de revestimento interno de paredes e tetos em argamassa e em gesso**. 2002. 202p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2002.

MEDEIROS, R. C. F. **Avaliação de desempenho de vedações verticais internas em chapas de gesso acartonado frente à ação da umidade**. 2003. 140p Exame de Qualificação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Editora PINI, São Paulo, 1994. 573p.

MIRANDA, L. F. R. **Desenvolvimento de metodologia para controle de produção de argamassas em usinas de reciclagem – Projeto de Pesquisa de Doutorado**. Processo FAPESP n.º 01/00610-6. 2001. 23 p. São Paulo.

MIRANDA, L. F. R. **Desenvolvimento de metodologia para controle de produção de argamassas em usinas de reciclagem – Relatório 01**. Processo FAPESP n.º 01/00610-6. 2002. 94 p. São Paulo.

MIRANDA, L. F. R. **Desenvolvimento de metodologia para controle de produção de argamassas em usinas de reciclagem – Relatório 02**. Processo FAPESP n.º 01/00610-6. 2003. São Paulo.

MIRANDA, L. F.R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassas com entulho reciclado**. São Paulo, 2000. 172p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.

MIRANDA, L.F.R.; AGUIAR, G.; SELMO, S.M.S. Análise da variabilidade de agregados miúdos reciclados pela usina de Socorro (SP). In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5., 2002. IPEN, São Paulo, 2002.

MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Argamassa com entulho reciclado. **Téchne**, v 74, p.68-71, Mai-Jun 2003.a

MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Avaliação de argamassas com entulhos reciclados, pro procedimentos racionais de dosagem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 3., Vitória, 1999. **Anais**. Vitória, ANTAC, 1999. p.295-307

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. 2003. INASMET. San Sebastian – Spain, 2003.b

MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Influência das propriedades mecânicas das argamassas na fissuração de revestimentos com RCD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., São Paulo, 2003. **Anais**. São Paulo, ANTAC, 2003.c

NAPPI, S. C. B.; PELUSO, S.; TONERA, R. Estudo Comparativo da resistência de rebocos à salinidade. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LAS CONSTRUCCIONES, 5.; CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD, 7., **Anais**. 1999.

NEDERLANDS NORMALISATIE-INSTITUUT. **Aggregates for concrete – determination of sulfide content – NEN 5936**. Delft, 1990.

NORME EUROPEENNE. **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.

NORME EUROPEENNE. **Methods of test for mortar for masonry – Part 13: Determination of dimensional stability of hardened mortars – EN 1015**. Brussels, 1993.

ODLER, I. Letter to the editor – Ettringite nomenclature. **Cement and Concrete Research**, v 27, p.473-74, 1997.

OLIVEIRA, M J. E. **Materiais descartados pelas obras de construção civil: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem**. 2002. 191p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2002.

Patologia das argamassas de revestimento - análise e recomendações. São Paulo, IPT, 1983. (Monografias, 8 – Publicação n. 1252).

PEREZ, D. D. **Estudo sobre a influência da variabilidade do agregado miúdo reciclado em concretos de média resistência.** 2004. 118p. Relatório final (Iniciação Científica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

PERKINS, R. B.; PALMER, C.D. Solubility of Etringite ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) at 5-75 °C. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v 63, p.1969-80, 1999.

PINTO, T. P. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

PINTO, T. P. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas.** 1986. 137p. Dissertação (Mestrado) – ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1986.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEIXO, D. M. Ensaio acelerado para simular a formação de eflorescência em argamassas endurecidas. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5.**, São Paulo, 2003. **Anais.** São Paulo, ANTAC, 2003.b

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEIXO, D. M. Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassas endurecidas. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5.**, São Paulo, 2003. **Anais.** São Paulo, ANTAC, 2003.a

RENDELL, F.; JAUBERTHIE, R. The deterioration of mortar in sulphate environments. **Construction and Building Materials**, v 13, p.321-27, jun 1999.

RILEM Recommendation. 121 – DRG Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**, v 27, p.557-559, 1994.

ROCHA, S. O pós-operatório. **A Construção São Paulo**, n. 2259, p. 10-11 ano 14, 27 de maio de 1991.

SBRIGHI NETO, C.; HAMASSAKI, L.T. Aspects of construction/demolition waste utilization. In: ECO- Urbs 95. Rio de Janeiro, 1995.

SBRIGHI NETO, C.; HAMASSAKI, L.T. Thecnical and economical aspects of con construction/demolition waste utilization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF SUSTAINABLE UTILIZATION – CIB. Gainsville, 1994. Proceedings. Florida, 1994.

SEELE, J.; GREVEN, H.; SELMO, S. M. S. **Umidade ascendente em paredes – panorama sobre o diagnostico e as soluções de reparo.** 2004. 15 p. São Paulo, 2004. No prelo.

SELMO, S. M. S. **Aço carbono em pastas de gesso de construção: estimativas de taxas de corrosão por impedância e por método gravimétrico conjugado à análise de imagem.** 1997. 4 v. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1997

SELMO, S. M. S. Agregados miúdos para argamassas de revestimento. **Anais EPUSP.** Serie a: Engenharia Civil, São Paulo, v.1, n.pt.5, p.129-48, 1988.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassas de cimento portland e cal para revestimento externo de fachada dos edifícios.** 1989. 209 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1989

SELMO, S. M. S. Estudo da fissuração em revestimentos de argamassa mista com traço padrão e diferentes condições de preparo e aplicação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 3., São Paulo, 1999. **Anais.** Vitória, ANTAC, 1999.

SELMO, S. M. S. et al. **Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso.** São Paulo : EPUSP, 2002. 27p. (Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil da universidade de São Paulo. BT/PCC/310)

SELMO, S. M. S. **Produção de argamassas em usinas de reciclagem de RCD – Projeto de Auxílio à Pesquisa**. Processo FAPESP n.º 01/11966-9. 24 p. São Paulo. 2001.

SELMO, S. M. S.; GALENI, P. C.; AGUIAR, G.; SEELE, J.; GREVEN, H. **Tecnologia alemã em teste para o controle de sulfatos solúveis em agregados reciclados**. 2004. 25 p. São Paulo, 2004. No prelo.

SELMO, S. M. S. et al. Microestrutura de pastas de gesso de construção – e feito da relação água / gesso e de alguns aditivos, por microscopia eletrônica de varredura. In: Gypsum Fair'97. **Anais**. Olinda, 1997.

SHERWOOD, P. T. **Soil stabilization with cement and lime**. London: HMSO, 1993. 153p.

SHIROMA, C. S. **Argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção - influência das condições de umidade após a moldagem**. 2004. 20p. Projeto de Pesquisa (Iniciação Científica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

SINDUSCON SP. Disponível em: <<http://sindusconsp.com.br>>. Acesso em: 19 out. 2003.

SOBERÓN, J. M. V. G.; RAMONICH, E. V.; FITE, L. A. **Hormigón com áridos reciclados. Una guía de diseño para el material**. 2001. 137p. Monografía n.º 60. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado**. 1999. 120p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal

STARK, J.; BOLLMANN, K. **Delayed ettringite formation in concrete**. Bauhaus-University Weimar / Germany

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2.ed. New York: Thomas Telford, 1997.

TAYLOR, H. F. W. Ettringite in cement paste and concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE, [s.l.], 1996. **Proceedings: Concrete: from material to structure.** [s.l.] RILEM, 1996. p.55-76.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v 31, p.683-93, Mai 2001.

TIAN, B.; COHEN, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? **Cement and Concrete Research**, v 30, p.117-23, Jan 2000.

UEMOTO, K. L. Patologia: danos causados por eflorescência. **Tecnologia de edificações.** São Paulo, IPT, 1988, p. 561-564.

USINA DE RECICLAGEM IRMÃOS PRETO LTDA. Disponível em: <<http://www.irmaospreto.com.br>>. Acesso em: 19 out. 2003.

VELASCO, R. V. **Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas.** 2002. 132p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

ZAMPIERI, V. A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação; hidratação e desempenho mecânico.** 1993. 233p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1993.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 1997. 140p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 1997.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos.** 2003. 481p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.