GUSTAV HAWLITSCHKE

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS
MIÚDOS RECICLADOS E A INFLUENCIA NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DE ARGAMASSAS**

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientadora:
Profa. Dra. Carina Ulsen

São Paulo
2014

GUSTAV HAWLITSCHK

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS
MIÚDOS RECICLADOS E A INFLUENCIA NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DE ARGAMASSAS**

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

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientadora:
Profa. Dra. Carina Ulsen

São Paulo
2014

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

São Paulo, 29 de novembro de 2014.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Hawlitschek, Gustav

**Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas / G. Hawlitschek. – ed. rev. -- São Paulo, 2014.
166 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Agregados (Propriedades; Reciclagem) 2.Reologia 3.Argamassa I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Silvia Maria de Oliveira, e meu irmão, Philippe Hawlitschek, pelo amor e dedicação incondicionais, ao meu tio, Marcelo Roque de Oliveira, o melhor pai que eu poderia ter tido e aos meus orientadores, Carina Ulsen e Henrique Kahn, por toda dedicação, ensino e respeito durante sua realização.

AGRADECIMENTOS

Tive a sorte de trabalhar com pessoas excepcionais na realização deste trabalho: meus orientadores Carina Ulsen e Henrique Kahn, que estiveram comigo desde a iniciação científica me instruindo para que eu pudesse me tornar o profissional que sou hoje, os professores Rafael Pileggi e Vanderley John, Fabio Cardoso, treinador do reômetro e parceiro de trabalho com quem eu poderia dividir grande parte dos créditos desta dissertação.

Agradeço também aos colegas de trabalho Daniel, Liz, Juliana, Freud, Sheila, Renato, Nery, Manuela e André, por tornarem o ambiente de trabalho menos cansativo e mais animador. A todo pessoal técnico do LCT, especialmente aos parceiros Igor Amaral e Patrick Lourenço, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Por fim agradeço a FAPESP pelo financiamento e incentivo a pesquisa, sem a qual eu não teria condições para me dedicar a pesquisa e realizar um trabalho de qualidade.

EPÍGRAFE

"Tempo é uma das coisas mais indefiníveis e paradoxais: o passado já se foi, o futuro ainda não chegou e o presente se torna o passado, mesmo enquanto procuramos defini-lo, e, como se fosse um relâmpago, num instante existe e se extingue".

Colton

SUMÁRIO

	página
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	19
2.2.1 <i>Geração</i>	20
2.2.2 <i>Gerenciamento e reciclagem de RCD</i>	22
2.2.3 <i>Aplicações</i>	29
2.3 PROCESSAMENTO MINERAL APLICADO À RECICLAGEM DE RCD.....	31
2.3.1 <i>Produção de areia reciclada</i>	32
2.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS MIÚDOS	40
2.4.1 <i>Distribuição granulométrica</i>	40
2.4.1 <i>Morfologia de partículas</i>	42
2.4.2 <i>Porosidade e área de superfície específica</i>	49
2.5 REOLOGIA APLICADA EM ARGAMASSAS.....	51
2.5.1 <i>Caracterização reológica de argamassas</i>	54
2.6 INCORPORAÇÃO DE ADITIVOS EM ARGAMASSAS E CONCRETOS	59
2.6.1 <i>Aditivos incorporadores de ar</i>	59
2.6.2 <i>Aditivos retentores de água</i>	61
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3.1 AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	63
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS MIÚDOS	65
3.3 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS.....	66
4 DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS POR POROSIMETRIA COM INTRUSÃO DE MERCÚRIO	69
4.1 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO.....	69
4.1.1 <i>Superfície específica</i>	72
4.2 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS.....	74
4.2.1 <i>Testes de enchimento</i>	75
4.2.2 <i>Procedimento com materiais de referência</i>	79
4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	97
5 DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIAS DE DIFERENTES MORFOLOGIAS.....	99

5.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	99
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS MIÚDOS	99
5.2.1	<i>Distribuição granulométrica e morfológica.....</i>	99
5.2.2	<i>Porosidade e massa específica.....</i>	103
5.3	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO REOLÓGICO	104
5.3.1	<i>Preparação das argamassas.....</i>	104
5.3.2	<i>Estado fresco</i>	104
5.3.3	<i>Avaliação das propriedades mecânicas</i>	109
5.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	110
6	DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIAS DE DIFERENTES POROSIDADES	112
6.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	112
6.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS AREIAS.....	113
6.2.1	<i>Distribuição granulométrica e morfologia.....</i>	113
6.2.2	<i>Composição química e mineralógica.....</i>	118
6.2.3	<i>Densidade, porosidade e superfície específica (BET)</i>	118
6.3	FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS	120
6.4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	121
6.4.1	<i>Rodada 1 – mistura mais fluida (teor de água elevado).....</i>	121
6.4.2	<i>Rodada 2 – mistura mais consistente (teor de água reduzido)</i>	127
6.4.3	<i>Avaliação da estabilidade das argamassas ao longo do tempo.....</i>	133
6.4.4	<i>Rodada 3 – incorporação de aditivos</i>	138
6.4.5	<i>Rodada 4 – ajuste do teor de aditivo para as argamassas recicladas ..</i>	141
6.4.6	<i>Conclusões da avaliação no estado fresco das argamassas.....</i>	146
6.5	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	147
6.5.1	<i>Densidade aparente e módulo de elasticidade (E)</i>	148
6.5.2	<i>Resistência mecânica</i>	150
6.5.3	<i>Conclusões do desempenho mecânico das argamassas no estado endurecido</i>	152
6.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	152
7	CONCLUSÕES.....	154
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Número e porte de minas de areia e brita no Brasil no ano de 2007 (LA SERNA e REZENDE, 2009)	18
Figura 2.2 – Variação do preço de areia por tonelada no Estado de São Paulo (LA SERNA e REZENDE, 2009)	19
Figura 2.3 – Estimativa da geração de RCD dos países da UE em 2005 (COMISSION, 2011)	21
Figura 2.4 - Proporção de finos nas amostras estudadas (ULSEN, 2010)	26
Figura 2.5 – Concentração de minérios (CHAVES, 1946).....	27
Figura 2.7 – Curvas de separabilidade para RCDs de diferentes origens (ULSEN, 2006) ...	33
Figura 2.8 – Ilustração do efeito da britagem na liberação entre as fases de rochas e a pasta de cimento na produção de agregado miúdo reciclado (ULSEN, 2011)	34
Figura 2.9 - Esquema de funcionamento do britador VSI (METSO, 2005)	35
Figura 2.10 - Distribuições granulométricas comparativas de RCDs britados em VSI sob diferentes rotações do equipamento (ULSEN, KAHN <i>et al.</i> , 2013).....	36
Figura 2.11 - Distribuição de agregados miúdos reciclados nos produtos de densidade da separação em líquidos densos (ULSEN, KAHN <i>et al.</i> , 2013)	37
Figura 2.12 - Curvas de separabilidade magnética por classe de densidade (ULSEN, KAHN <i>et al.</i>)	38
Figura 2.13 – Separador magnético por rolo de terras raras (REROLL).....	39
Figura 2.14 – Efeito da distribuição granulométrica das partículas na densidade de empacotamento (PILEGGI, 2001)).....	41
Figura 2.15 – Comparação dos modelos de empacotamento de distribuições contínuas	42
Figura 2.16 - Gabarito para a avaliação visual da esfericidade e arredondamento das partículas (KRUMBEIN e SLOSS, 1956).....	43
Figura 2.17 - Esquema de funcionamento do analisador de imagens por fluxo dinâmico, modelo Camsizer-L.....	46
Figura 2.18 - Parâmetros considerados em medidas de tamanho de partículas por análise de imagens.....	47
Figura 2.19 – Correlação entre a relação de aspecto (b/l) e a esfericidade de areias comerciais (medidas do equipamento CAMSIZER)	48
Figura 2.20 – relação entre o menor e o maior diâmetro da partícula para diferentes valores de b/l (relação de aspecto)	49
Figura 2.21 - Condições de umidade de agregados.....	50

Figura 2.22 – Representação esquemática da perturbação pela presença de partículas imersas entre as linhas de fluxo do líquido sob cisalhamento (PILEGGI, 2001).....	52
Figura 2.23 – Ilustração do conceito de distância média de separação entre partículas (PILEGGI, 2001)	53
Figura 2.24 – Representação esquemática da mesa de consistência (PILEGGI, 2001).....	55
Figura 2.25 - Reômetro POLI-USP para argamassas e concretos	56
Figura 2.26 - Curvas de mistura das argamassas comerciais de revestimento avaliadas no reômetro POLI-USP sob rotação constante. A energia de mistura é determinada como a área embaixo da curva	57
Figura 2.27 - Curvas reológicas (torque x rotação), obtidas no reômetro POLI-USP com configuração em planetário, de formulações de argamassas para aplicações distintas	58
Figura 2.28 – Geometria utilizada nos ensaios de squeeze-flow em argamassas de revestimento, conforme ABNT NBR 15839:2010. (a) Início do teste; (b) Final do teste (CARDOSO, 2009)	58
Figura 2.29 - Avaliação reológica por squeeze-flow de diferentes argamassas de revestimento do mercado nacional (ENGMANN, SERVAIS <i>et al.</i> , 2005; CARDOSO, 2009)	59
Figura 2.30 – Ilustração de uma molécula de incorporador de ar e suas interações com diferentes interfaces (ROMANO, 2013).....	60
Figura 2.31 – Efeito da utilização de incorporadores de ar na argamassa (ROMANO, 2013)	60
Figura 2.32 – Estrutura molecular da celulose e alguns substituintes (CLASEN e KULICKE, 2001; BETIOLI, 2007)	61
Figura 3.1 - Fluxograma do processamento das amostras de areias recicladas utilizadas ..	63
Figura 3.2 – Distribuição granulométrica das amostras determinada por peneiramento a úmido	65
Figura 3.3 - Programa de rotações do teste de ciclo de cisalhamento	67
Figura 3.4 - Equipamento de ultrassom para medida do módulo de elasticidade	68
Figura 3.5 – Teste de resistência à tração por compressão diametral	68
Figura 4.1 - Porosimetria com intrusão de mercúrio.....	69
Figura 4.2 – Ilustração da penetração do mercúrio nas diferentes pressões de enchimento no penetrômetro	70
Figura 4.3 – Relação entre a pressão de enchimento e diâmetro médio de poros (ângulo de contato de 130°)	71
Figura 4.4 – Modelo de cálculo da superfície específica pelo equipamento AUTOPORE IV 9500	73
Figura 4.5 – Ensaio com pressão de enchimento de 0,53 psi, amostra VSI 65-75.....	74
Figura 4.6 – Comparação dos resultados com diferentes pressões de enchimento.....	76

Figura 4.7 – Seleção do penetrômetro a ser utilizado com base nas características do material	78
Figura 4.8 – Distribuição de forma por faixa granulométrica das esferas de vidro.....	80
Figura 4.9 - Volume de mercúrio introduzido por fração granulométrica (análise de esferas de vidro, com pressão de enchimento de 2 psi)	81
Figura 4.10 - Volume de mercúrio introduzido por intervalo granulométrico (análise de esferas de vidro, com pressão de enchimento de 2 psi)	83
Figura 4.11 – Correlação entre o tamanho das esferas com a porosidade resultante com diferentes pressões de enchimento	86
Figura 4.12 – Ilustração da região entre as esferas de difícil acesso ao mercúrio.....	87
Figura 4.13 – Forma das partículas (b/l) de areia de brita (areia Caj) e esferas de vidro por intervalo granulométrico.....	88
Figura 4.14 – Comparação do volume diferencial por pressão da fração grossa (-1,2+0,85 mm) das esferas de vidro com a areia de brita (areia Caj)	89
Figura 4.15 - Comparação do volume diferencial por pressão da fração fina (-0,21+0,15 mm) das esferas de vidro com a areia de brita (areia Caj)	90
Figura 4.16 - Comparação do volume diferencial por pressão da das esferas de vidro com a areia de brita (areia Caj) com e sem a presença da fração -0,30 mm	90
Figura 4.17 – Distribuição granulométrica por análise de imagens dinâmica, pó de café.....	92
Figura 4.18 – Parâmetros de forma por faixa granulométrica, pó de café	92
Figura 4.19 - Comparação dos resultados com diferentes pressões de enchimento.....	93
Figura 4.20 – Aspecto geral da amostra de pó de café	95
Figura 4.21 – Detalhamento dos poros da amostra de pó de café	96
Figura 5.1 - Distribuição granulométrica das diferentes areias.....	100
Figura 5.2 – Frequência acumulada abaixo versus esfericidade de partículas.....	101
Figura 5.3 – Esfericidade média por faixa granulométrica.....	102
Figura 5.4 – Frequência acumulada abaixo versus relação de aspecto das partículas	102
Figura 5.5 – Relação de aspecto media por faixa granulométrica.....	103
Figura 5.6 – Curvas de mistura para argamassas com diferentes conteúdos de água.....	105
Figura 5.7 – Distribuição das fases das argamassas	105
Figura 5.8 – Relação entre a forma das partículas e o consumo de água para um mesmo torque de mistura medido no reômetro	107
Figura 5.9 - Curvas reológicas das argamassas	108
Figura 5.10 - Correlação dos resultados da mesa de consistência com a quantidade de água adicionada na argamassa.....	108
Figura 5.11 - Resultados do ensaio squeeze-flow.....	109

Figura 5.12 – Ilustração do aumento do consumo de água de um meio com partículas alongadas em relação a um meio com partículas esféricas para que ambos tenham a mesma viscosidade ((PILEGGI, 2001) modificada)	111
Figura 6.1 – Distribuição granulométrica das areias por diferentes técnicas	114
Figura 6.2 – Frequência acumulada abaixo versus esfericidade das partículas	116
Figura 6.3 – Esfericidade ao longo do intervalo granulométrico	116
Figura 6.4 - Frequência acumulada abaixo versus relação de aspecto das partículas	117
Figura 6.5 – Relação de aspecto ao longo do intervalo granulométrico	117
Figura 6.6 – Relação entre área superficial (BET) e porosidade (por intrusão de Hg)	119
Figura 6.7 - Volume de Hg introduzido para cada diâmetro de poro	120
Figura 6.8 – Distribuição granulométrica das argamassas (areia+cimento)	121
Figura 6.9 – Curvas de mistura para determinação do consumo de água das argamassas - 1 rodada (% de água em massa)	123
Figura 6.10 - Correlação entre o torque de mistura resultante e a porosidade das areias para uma adição de 15%, em massa, de água nas argamassas	124
Figura 6.11 – Curvas de mistura das argamassas – 1 rodada	125
Figura 6.12 – Distribuição de fases das argamassas – 1 rodada	125
Figura 6.13 – Curvas reológicas das argamassas – 1 rodada	126
Figura 6.14 - Curvas de mistura para determinação do consumo de água das argamassas - 2 rodada (% de água em massa)	128
Figura 6.15 – Correlação entre a porosidade dos grãos e a relação a/c obtida – 1 e 2 rodada	130
Figura 6.16 – Curva de mistura das argamassas - 2 rodada	130
Figura 6.17 – Distribuição de fases das argamassas – 2 rodada	131
Figura 6.18 – Curvas reológicas das argamassas – 2 rodada	131
Figura 6.19 – Resultados do ensaio squeeze-flow – 2 rodada	133
Figura 6.20 – Fluxograma do experimento para avaliação da estabilidade das argamassas no tempo	134
Figura 6.21 - Curvas de mistura das argamassas – estabilidade no tempo	134
Figura 6.22 - Distribuição de fases das argamassas – estabilidade no tempo (t = 0 min.) .	135
Figura 6.23 – Ciclos de cisalhamento das argamassas na avaliação da estabilidade no tempo (C1 = 0 min.; C2 = 30 min.; C3 = 60 min.)	137
Figura 6.24 – Curvas de mistura das argamassas com aditivos (3 rodada)	139
Figura 6.25 - Distribuição de fases das argamassas com aditivos (3 rodada)	139
Figura 6.26 – Curvas reológicas das argamassas com aditivos (3 rodada)	140

Figura 6.27 – Curvas de mistura das argamassas naturais e VSI-NÃOmag (comparativo 3 e 4 rodada)	142
Figura 6.28 – Curvas de mistura das argamassas – 4 rodada	143
Figura 6.29 - Distribuição de fases das argamassas – 4 rodada	143
Figura 6.30 – Relação entre teor de aditivo e teor de ar incorporado para as diferentes areias	144
Figura 6.31 – Curvas reológicas das argamassas – 4 rodada.....	145
Figura 6.32 – Resultados do ensaio squeeze-flow – 3 e 4 rodadas	146
Figura 6.33 - Densidade aparente e módulo de elasticidade (28 dias de cura) – 1 rodada	148
Figura 6.34 - Densidade aparente e módulo de elasticidade (28 dias de cura) – 2 rodada	148
Figura 6.35 - Densidade aparente e módulo de elasticidade (28 dias de cura) – 3 rodada	149
Figura 6.36 - Densidade aparente e módulo de elasticidade (28 dias de cura) – 4 rodada	149
Figura 6.37 – Correlação entre a soma do teor de água e ar no estado fresco com a porosidade dos corpos no estado endurecido	150
Figura 6.38 – Resistência à tração por compressão diametral (28 dias de cura) – 1, 2 e 3 rodada	151
Figura 6.39 - Resistência à tração por compressão diametral (28 dias de cura) – 4 rodada	151
Figura 6.40 – Relação entre a resistência à tração com a porosidade dos corpos de prova	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Lista dos 10 bens minerais mais produzidos no Brasil nos anos de 2011 e 2012 (DNPM, 2012).....	17
Tabela 2.2 – Comparativo da estimativa de geração de RCD com os bens minerais produzidos pelo país.....	20
Tabela 2.3 – Estimativa da composição dos RCD em alguns países da UE (COMISSION, 2011)	22
Tabela 2.4 – Situação das usinas de reciclagem de RCD no Brasil em 2008 (MIRANDA, ANGULO <i>et al.</i> , 2009).....	25
Tabela 2.5 – Equações de balanço de massa/metalúrgico (VALADÃO e ARAUJO, 2007) ..	28
Tabela 2.6 – Panorama dos requisitos para utilização dos agregados reciclados (GONÇALVES e DE BRITO, 2010).....	29
Tabela 2.7 – Panorama das aplicações dos agregados reciclados (GONÇALVES e DE BRITO, 2010).	30
Tabela 2.8 – Condições operacionais do REROLL para separação de areia reciclada (ULSEN, 2011)	39
Tabela 2.9 – Parâmetros de feições morfológicas de partículas	44
Tabela 3.1 – Sumário das amostras utilizadas e dos objetivos de cada etapa dos estudos.	64
Tabela 4.1 – Ângulo de contato de alguns materiais com mercúrio (SMITHWICH III, 1988; LEÓN Y LEÓN, 1998; LOWELL, SHIELDS <i>et al.</i> , 2006)	72
Tabela 4.2 – Testes de enchimento com diferentes pressões e tempo de equilíbrio.....	75
Tabela 4.3 - Ensaio com pressão de enchimento de 20 psi para diferentes frações granulométricas	79
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de porosimetria para as esferas de vidro por fração granulométrica (pressão de enchimento de 2 psi).....	81
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de porosimetria para as esferas de vidro por intervalo granulométrico (pressão de enchimento de 2 psi).....	83
Tabela 4.6 – Porosidade residual para as esferas de vidro com pressão de enchimento de 100 psi.....	87
Tabela 4.7 – Resultados da porosimetria por intrusão de Hg com diferentes pressões de enchimento para as amostras de areia de brita (areia Caj)	91
Tabela 4.8 – Resultados da porosimetria por intrusão de Hg com diferentes pressões de enchimento	94
Tabela 5.1 – Parâmetros médios de forma das diferentes areias	100
Tabela 5.2 – Porosidade e massa específica.....	104

Tabela 5.3 – Composição das argamassas	104
Tabela 5.4 – Propriedades dos corpos de prova das argamassas (28 dias de cura)	110
Tabela 6.1 – Sumário da distribuição de tamanho (mm) e parâmetros de forma das partículas	115
Tabela 6.2 – Composição química das amostras estudadas	118
Tabela 6.3 – Densidade (ρ), porosidade e área superficial (BET) das amostras	119
Tabela 6.4 – Formulações das argamassas	120
Tabela 6.5 – Teor de água final para torque de 1N.m e relação água/cimento – 1 rodada	124
Tabela 6.6 – Espalhamento das argamassas na mesa de consistência – 1 rodada.....	126
Tabela 6.7 – Teor de água final para torque de 1N.m e relação água/cimento – 2 rodada	129
Tabela 6.8 – Espalhamento das argamassas na mesa de consistência – 2 rodada.....	132
Tabela 6.9 – Teor de ar das argamassas ao longo do tempo	135
Tabela 6.10 – Espalhamento das argamassas com aditivos na mesa de consistência (3 rodada)	140
Tabela 6.11 – Dosagem do AIA (primeiro teste)	142
Tabela 6.12 – Dosagem do AIA (segundo teste).....	144
Tabela 6.13 – Espalhamento das argamassas na mesa de consistência – 4 rodada.....	145
Tabela 7.1 – Proporção na redução dos parâmetros das argamassas formuladas com diferentes areias, tendo-se como referência à areia artificial de Cajamar	156

RESUMO

A construção civil consome uma quantidade enorme de matérias primas minerais e por consequência também gera uma grande quantidade de resíduos, denominados resíduos de construção e demolição (RCD). No Brasil a estimativa é de que são geradas mais de 70 milhões de toneladas de RCD por ano, ficando atrás apenas da produção de minério de ferro, areia e brita.

A reciclagem de RCD, tanto no Brasil como em outros países, envolve basicamente etapas de britagem e peneiramento, sendo poucas as usinas que utilizam o beneficiamento mineral para a separação das fases porosas inorgânicas, as quais causam inúmeras dificuldades na utilização dos agregados reciclados como materiais de construção.

Estudos recentes comprovaram a eficácia do beneficiamento mineral na produção de agregados reciclados de baixa porosidade. No entanto, a aplicação em argamassas e concretos ainda não é recomendada e tampouco regulamentada, principalmente pela ausência de procedimentos de caracterização dos produtos gerados.

Nesse contexto, o presente trabalho avalia a técnica de medida de porosidade por meio de intrusão de mercúrio em agregados miúdos reciclados e a influência deste parâmetro no comportamento reológico de argamassas. Complementarmente, são também estudados o comportamento reológico de misturas cimentícias formuladas com areias com diferentes características (morfologia e porosidade).

Foram utilizadas três areias recicladas com diferentes porosidades e três areias comerciais (naturais ou oriundas de britagem de rochas) de referência com diferentes formas. As areias foram caracterizadas e, posteriormente, foram utilizadas na formulação de argamassas, as quais foram avaliadas tanto no estado fresco como no endurecido.

A porosimetria por intrusão de mercúrio mostrou-se uma alternativa mais rápida e precisa na determinação da porosidade de areias recicladas. Contudo, para estudos de materiais particulados de granulometria fina, abaixo de 300 μm , a definição das condições operacionais torna-se determinante.

Os resultados mostraram que apesar das diferentes características das areias (forma e porosidade), estas podem apresentar um comportamento reológico similar em função do teor de água e de aditivos adicionados à mistura cimentícia.

Por outro lado, a porosidade dos agregados influencia diretamente nas propriedades mecânicas da mistura, pois quanto maior o consumo de água e o teor de ar incorporado, maior será a porosidade no estado endurecido e, conseqüentemente, menor sua resistência à compressão.

Sendo assim, o estabelecimento do equilíbrio entre o investimento em tecnologias de processamento mineral para redução da porosidade ou a tolerância ao aumento no consumo de água e aditivos está mais diretamente relacionado à viabilidade econômica do que técnica. Uma alternativa ao beneficiamento mineral após a britagem, seria a substituição parcial dos agregados naturais pelos reciclados; com isso, tem-se uma redução da porosidade total da mistura e a incorporação parcial de agregados reciclados, com mínima intervenção no sistema.

Palavras-Chave: agregados miúdos reciclados, resíduos de construção e demolição - RCD, caracterização tecnológica, reologia de argamassa.

ABSTRACT

The construction industry consumes an enormous amount of mineral raw materials and consequently also generates lots of waste, known as construction and demolition waste (CDW). In Brazil, it is estimated that over 70 million tons of CDW are generated per year, which is equivalent to the fourth position in national ranking of mineral commodities production.

Recycling of CDW, in Brazil and in other countries, basically involves crushing and screening stages. Few plants use mineral processing for the separation of inorganic porous phases, responsible for many limitations on recycled aggregates application as construction material.

Recent studies have proven the effectiveness of mineral beneficiation in the production of low porosity recycled aggregates. However, application in mortar and concrete is still not recommended nor regulated, mainly by the absence of characterization procedures of generated products.

In this context, this research evaluates the mercury intrusion porosity technique for characterization of recycled fine aggregates and the influence of this parameter on the rheological behavior of mortars. Additionally, the rheological behavior of mortars composed with fine aggregates with different characteristics (morphology and porosity) are also studied.

Recycled sands with three different porosities and three commercial sands (natural or produced by rocks crushing) with different shapes were used. The sands were characterized and used on mortars composition, which were analyzed in fresh and hardened state.

The mercury intrusion porosimetry proved to be a faster and accurate method in determining the porosity of recycled sands. However, the operations conditions and experimental procedure for the characterization of fine particulate materials, mainly below 300 μm , plays a major role for reproducible results.

The results showed that despite the different sands features (porosity and shape), they may have similar rheological behavior as a function of water content and additives added to the mortars.

Aggregates porosity influences directly the mechanical properties of the mortar, the higher the water consumption and air content, the higher the porosity in the hardened state and consequently the lower the compression resistance.

Thus, the establishment of the equilibrium between the investments in mineral processing technologies to reduce the aggregates porosity or the tolerance for increasing water and additives consumption is more related to the economic viability than technically. An alternative to mineral beneficiation after crushing would be the partial replacement of natural aggregates by recycled ones, this will lead to a lower porosity system with partial incorporation of recycled aggregates.

Key words: recycled fine aggregates, construction and demolition waste - CDW, technological characterization, mortar rheology.

1 INTRODUÇÃO

Os agregados para construção civil (areia e brita) são bens de baixo valor unitário, uma vez que seu beneficiamento é simples (em sua maioria apenas etapas de britagem e/ou peneiramento), porém estão entre os produtos mais comercializados da indústria mineral. No Brasil a produção de areia e brita, em 2011, foi de quase 600 milhões de toneladas, sendo 90% da produção destinado à construção civil.

Assim como a construção civil consome uma quantidade enorme de matérias primas minerais (cerca de 50% de toda matéria prima extraída do planeta), também gera uma grande quantidade de resíduos, denominados resíduos de construção e demolição (RCD), que são os resíduos gerados durante o ciclo de vida das construções. No Brasil, a estimativa é de que são geradas mais de 70 milhões de toneladas de RCD por ano, ou seja, quantidade superior a 400 kg/hab por ano. Caso o RCD fosse um bem mineral produzido pelo país atualmente, ocuparia a quarta posição no ranking nacional ficando atrás apenas do minério de ferro, areia e brita.

Nos municípios de médio e grande porte, os grandes volumes de RCD são dispostos em aterros de inertes, os quais têm vidas úteis muito curtas. Em municípios menores, ou com menor taxa de geração de resíduos, estes são muitas vezes dispostos em áreas impróprias ou ilegais. Uma solução definitiva precisaria, portanto, reduzir o volume de resíduos gerados e secundariamente promover a reutilização dos mesmos por meio da reciclagem.

A maioria das usinas de reciclagem de RCD, tanto no Brasil como em outros países, envolvem basicamente etapas de britagem e peneiramento, tendo como foco a produção de agregados graúdos (fração acima de 4,8 mm). Os agregados miúdos (fração passante em peneira de 4,8 mm) são muitas vezes descartados como resíduo da própria reciclagem.

Neste sentido, uma pesquisa inovadora com foco na produção de areia reciclada desenvolvida por Ulsen e colaboradores (ULSEN, KAHN *et al.*; ULSEN, 2006; ULSEN, HAWLITSCHKEK *et al.*, 2010; ULSEN, 2011; ULSEN, KAHN *et al.*, 2013), mostra que a cominuição de todo RCD em uma granulometria de areia, abaixo de 3,0 mm gera um produto com menor conteúdo de pasta de cimento, e, portanto, menor porosidade. Complementarmente à etapa de britagem, foram estudadas diversas operações unitárias para separação e remoção de partículas porosa, como separações magnéticas, densitárias e processos de atrição e desbaste.

O conteúdo de pasta de cimento remanescente de construções anteriores é o que origina os maiores problemas em agregados reciclados: alta porosidade e absorção de água, elevado índice de abrasão Los Angeles e maiores teores de sulfato. Do ponto de vista mecânico, afeta também a elasticidade, a durabilidade e a resistência à compressão. Contudo, não existem métodos normatizados para determinação do teor de pasta de cimento em agregados reciclados e, adicionalmente, não é possível diferenciar ou quantificar as fases presentes nos RCD por meio de análises químicas ou mineralógicas.

Dentro deste contexto, o objetivo do presente trabalho é caracterizar agregados miúdos reciclados e avaliar a influência da forma e da porosidade das partículas no comportamento reológico de argamassas. Os resultados serão fundamentais para avaliar o desempenho de argamassas confeccionadas com agregados reciclados obtidos por diferentes métodos de beneficiamento e, portanto, estabelecer os limites tecnológicos entre o processamento mineral e a aplicação. Assim, este trabalho fornecerá subsídios para se determinar quanto deve ser investido na melhoria das propriedades dos agregados reciclados (redução das fases porosas) e quanto estas devem ser ajustadas por meio da adição de aditivos químicos na formulação das misturas cimentícias.

1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é caracterizar agregados miúdos reciclados e avaliar a influência da forma e da porosidade das partículas no comportamento reológico de argamassas.

Para facilitar o entendimento do leitor, os resultados apresentam-se subdivididos em capítulos com os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer procedimentos para determinação da porosidade de agregados miúdos reciclados por meio de porosimetria por intrusão de mercúrio;
- Avaliar o comportamento reológico de argamassas formuladas com agregados miúdos de diferentes morfologias;
- Avaliar o comportamento reológico de argamassas formuladas com agregados miúdos reciclados com diferentes porosidades.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 1 - Introdução. Apresenta ao leitor o contexto e objetivo geral do trabalho desenvolvido e apresenta as justificativas e relevância da pesquisa.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica. Apresenta o contexto atual da geração e do gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD). São descritas as dificuldades dos processos de reciclagem de RCD para a produção de agregados (como a falta de ensaios padronizados para o controle de qualidade dos produtos gerados) e da sua utilização em atividades mais nobres como argamassas (devido, principalmente, a sua elevada porosidade e forma irregular).

Capítulo 4 - Materiais e métodos. Apresenta o procedimento experimental empregado e os materiais estudados. Como os materiais e métodos para cada atividade posteriormente realizada diferem, este item é retomado no início de cada capítulo subsequente.

Capítulo 5 - Determinação da porosidade de agregados miúdos reciclados por porosimetria com intrusão de mercúrio. Apresenta uma revisão bibliográfica específica da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, abordando desde os cálculos do equipamento até a análise dos resultados obtidos (porosidade, superfície específica e distribuição de tamanhos poros). Posteriormente, são avaliadas as dificuldades para a análise de materiais com granulações mais finas e as alternativas para análises de agregados miúdos reciclados.

Capítulo 6 – Desempenho reológico de argamassas com areias de diferentes morfologias. Discute os parâmetros obtidos na caracterização da forma das partículas por meio da técnica de análise de imagens por fluxo dinâmico (2D) e a influência desses parâmetros no desempenho reológico de argamassas.

Capítulo 7 – Desempenho reológico de argamassas com areias de diferentes porosidades. Discute a influência da porosidade das areias recicladas em parâmetros críticos de argamassas, como o consumo de água e aditivos e na sua estabilidade ao longo do tempo em comparação com areias naturais.

Capítulo 8 - Conclusão. Congrega as principais informações obtidas na dissertação destacando os pontos principais na caracterização das propriedades dos agregados miúdos reciclados e sua influência no comportamento reológico em argamassas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo a norma brasileira NBR 9935 (ABNT, 2005a), define-se agregado como “material sem forma ou volume definido, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto”. Sua principal aplicação é em obras da construção civil, como a fabricação de concretos e argamassas, construção de base de estradas de rodagem, lastro de vias férreas, elemento filtrante, etc.

De acordo com a granulometria do material, os agregados podem ser subdivididos em:

- a) agregado graúdo: corresponde a “material granular com pelo menos 95% em massa retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm” conforme a NBR 9935 e (ABNT, 2005a);
- b) agregado miúdo “material granular com pelo menos 95% em massa passante na peneira com abertura de malha de 4,75 mm” (op. cit.).

Os agregados para construção civil são bens de baixo valor unitário, uma vez que seu beneficiamento é simples (em sua maioria apenas etapas de britagem e/ou peneiramento), porém estão entre os produtos mais comercializados da indústria mineral (LA SERNA e REZENDE, 2009). No Brasil, os agregados naturais estão entre os bens minerais mais consumidos sendo 90% da produção destinada à construção civil (WHITAKER, 2001).

Analisando-se a Tabela 2.1, a qual apresenta o ranking dos bens minerais mais produzidos no país, fica evidente a magnitude do consumo dos agregados: areia e brita ocupam a segunda e terceira posição, com produções da ordem de 300 milhões de toneladas cada. Nos Estados Unidos o consumo de agregados, em 1999, foi de 2,7 bilhões de toneladas (ROBINSON, MENZIE et al., 2004).

Tabela 2.1 – Lista dos 10 bens minerais mais produzidos no Brasil nos anos de 2011 e 2012¹ (DNPM, 2012)

Matérias primas minerais	Produção (10 ⁶ t)	
	2011	2012
Ferro	398,1	400,8
Areia	346,8	369,0
Brita	268,0	287,0
Cimento	64,2	68,8
Alumínio	33,1	33,2
Calcário Agrícola	28,7	33,0
Rochas Ornamentais e de Revestimento	9,0	9,3
Cal	8,2	8,3
Fosfato	6,7	6,7
Carvão Mineral	6,2	6,6

Dados preliminares disponibilizados pelo DNPM que correspondem à produção beneficiada (concentrado contido no total extraído)

Outro ponto importante no mercado de agregados é a distância entre produtor e comprador. Os gastos com transporte representam cerca de 1/3 do custo de produção da areia e cerca de 2/3 do custo de produção da brita (LA SERNA e REZENDE, 2009). Isto faz com que a produção de agregados seja bastante descentralizada espacialmente com uma grande quantidade de empreendimentos e, em sua maioria, de pequeno porte (Figura 2.1). De maneira geral o que ocorre é a formação de micromercados separados por um raio de até 150 km (LA SERNA e REZENDE, 2009). Distâncias maiores fazem com que o gasto com transporte aumente muito, fazendo com que o produto perca competitividade independentemente de suas propriedades (granulometria, forma, etc.).

¹ https://sistemas.dnrm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7366

Figura 2.1 – Número e porte de minas de areia e brita no Brasil no ano de 2007 (LA SERNA e REZENDE, 2009)

A construção civil consome cerca de 50% de todos os recursos naturais extraídos no planeta (JOHN, 2000). Além do consumo excessivo de matérias-primas naturais não renováveis, os impactos ambientais dessas atividades de extração de matérias-primas são relevantes dadas a sua escala. A simples extração de areia natural, em 2005, era cerca de 90% oriunda dos leitos de rios (ALMEIDA e SILVA, 2005), o que causa impactos importantes.

Adicionalmente, a exaustão das jazidas de areia já vem sendo observada desde 2001 na RMSP, principalmente na direção da nascente do Rio Tietê (WHITAKER, 2001). Isso, aliado ao aumento da fiscalização e dificuldade de abertura de novas jazidas próximas às cidades leva a crescentes distâncias de transporte dos agregados naturais, o que impacta diretamente no seu preço. Nos últimos 10 anos o preço da areia praticamente triplicou no estado de São Paulo (Figura 2.2).

Outro problema causado pelo aumento na distância de transporte dos agregados é o aumento do tráfego de caminhões nas cidades. Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) a circulação de caminhões para transporte de agregados chega a 1,35 milhões de viagens/ano ou 5.000 viagens/dia (COELHO, 2001), contribuindo com queima de combustível fóssil e emissão de CO₂.

Figura 2.2 – Variação do preço de areia por tonelada no Estado de São Paulo (LA SERNA e REZENDE, 2009)

2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Assim como a construção civil consome uma quantidade enorme de matérias-primas minerais, também gera uma grande quantidade de resíduos (CACHIM, 2009), denominados resíduos de construção e demolição (RCD), que são os resíduos gerados durante o ciclo de vida das construções civis. Para a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) RCD é definido como o resíduo proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc. Dentro ainda desta definição os resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados como agregados são denominados “resíduos classe A”, sendo estes os que serão utilizados no presente trabalho.

O conteúdo de pasta de cimento remanescente de construções anteriores é o que origina os maiores problemas em agregados reciclados (BARRA e VAZQUEZ, 1998;): alta porosidade e absorção de água, elevado índice de abrasão Los Angeles e maiores teores de sulfato. Do ponto de vista mecânico, afeta também a elasticidade, a durabilidade e a resistência à compressão. Contudo, não existem métodos normatizados para determinação do teor de pasta de cimento em agregados reciclados (ULSEN, 2011).

2.2.1 Geração

No Brasil a estimativa é de que são geradas mais de 70×10^6 t de RCD por ano (dados de 2003 apontavam para esse montante (JOHN, ANGULO *et al.*, 2004)), ou seja, quantidade superior a 400 kg/hab.ano. Caso o RCD fosse um bem mineral produzido pelo país atualmente, ocuparia a quarta posição no ranking nacional ficando atrás apenas do ferro, areia e brita (Tabela 2.2). Vale ressaltar que esta estimativa de geração dos RCD é anterior ao “boom” da construção civil e das construções para os eventos internacionais (Copa do Mundo 2014 e Olimpíadas 2016). Sendo assim, pode-se afirmar que a geração de RCD é ainda maior.

Tabela 2.2 – Comparativo da estimativa de geração de RCD com os bens minerais produzidos pelo país

Matérias primas minerais e resíduos	Produção x 10^6 t (2012)
Ferro	400,8
Areia	369,0
Brita	287,0
RCD	70,0*
Cimento	68,8

* dado de 2003

Estima-se que em cidades de médio a grande porte, a geração de RCD represente de 13 a 67% (HENDRIKS, 2000; JOHN, 2000) em massa de todo o resíduo sólido urbano gerado (RSU). No Brasil esse valor é estimado em 50% (PINTO, 1999).

Na União Europeia estima-se que são geradas entre 310 e 700×10^6 t de RCD por ano (dados de 2005 publicados pela European Commission (COMMISSION, 2011)), cerca de 0,63 a 1,42 t/hab.ano. Dentre os países da UE existem grandes diferenças na geração de RCD, como mostra a Figura 2.3. Essas altas variações geográficas, contudo, de acordo com os próprios autores e pesquisadores envolvidos no levantamento de dados, não podem ser encaradas como o reflexo real da geração dos RCD; segundo eles, as maiores razões para essas elevadas diferenças são desigualdades no controle e fiscalização dos RCD.

Figura 2.3 – Estimativa da geração de RCD dos países da UE em 2005 (COMISSION, 2011)

Essencialmente, a composição dos RCD depende de dois fatores: a natureza dos processos construtivos e, consequentemente, dos materiais empregados (ULSEN, 2011). Em geral, é composto por uma parcela expressiva de materiais inorgânicos e uma parcela menor de orgânicos (madeira, papel, plástico, dentre outros). A fração mineral, composta por materiais de construção, como concreto, asfalto, argamassas, cerâmicas e rochas, representa cerca de 90% dos RCD segundo diversos autores (CARNEIRO, CASSA *et al.*, 2000; HENDRIKS, 2000; FERRAZ, 2001; ANGULO, TEIXEIRA *et al.*, 2011).

Naturalmente, a composição dos RCD, assim como de seus contaminantes, varia de uma região para outra. A Tabela 2.3 mostra a composição média de alguns países europeus.

Tabela 2.3 – Estimativa da composição dos RCD em alguns países da UE (COMISSION, 2011)

País	Holanda	Dinamarca	Estônia	Finlândia	Rep.Checa	Irlanda	Espanha	Alemanha
Ano	2001	2003	2006	2006	2006	1996	2005	2007
concreto	40%	32%		33%	33%		12%	
cerâmica	25%	43%	17%	8%	35%	80%	54%	70%
Asfalto	26%	24%	9%	-	-	4%	5%	27%
madeira	2%	-	-	41%	-	-	4%	-
metal	1%	-	40%	14%	-	4%	3%	-
gesso	-	-	-	-	-	-	0,20%	0,40%
plástico	-	-	-	-	-	-	2%	-
outros	9%	36%	34%	12%	32%	12%	21%	3%

Para a grande maioria dos países, os teores de resíduos mistos (concreto+cerâmica) variam de 40% a 80%. Essa predominância de resíduos mistos é também a realidade no Brasil, assim como em outros países europeus (ULSEN, 2011). Japão e Austrália possuem seus RCD compostos basicamente por concreto (TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005; TAM, 2009). Os teores de contaminantes (madeira, gesso, metal, etc.) apresentam uma grande variação.

A preocupação recorrente se deve essencialmente à destinação destes resíduos. A existência de atividades informais de deposições irregulares de resíduos e de extração ilegal de agregados, por exemplo, é um agravante do crescente conflito com o crescimento das cidades, e tem levado a um aumento das regulamentações ambientais destas atividades.

Adicionalmente, as preocupações com a sustentabilidade no meio ambiente construído devem-se ao fato de a construção ser o setor que mais consome recursos naturais no mundo (PINTO, 1999; JOHN, 2000), pela participação expressiva na taxa de geração de poluentes (JOHN, AGOPYAN *et al.*, 2001), por ser a maior fonte de geração dos resíduos sólidos urbanos (HENDRIKS, 2000; JOHN, 2000), e pela sua importância no desenvolvimento econômico e social do país. Como consequência, o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) tornou-se uma questão econômica e ambiental prioritária em escala global (POON, 2007a).

2.2.2 Gerenciamento e reciclagem de RCD

Nos municípios de médio e grande porte, os grandes volumes de RCD são dispostos em aterros de inertes, também denominados de “bota-foras”. Os bota-foras são áreas de pequeno e grande porte, públicas ou privadas, designadas para a

recepção dos RCD e outros resíduos sólidos inertes. As áreas privadas normalmente são ofertadas quando há interesse de planificá-las e, com isso, conquistar valorização no momento da sua comercialização.

Os aterros têm, no entanto, vidas úteis muito curtas. Seu esgotamento é extremamente rápido, tanto pelo elevado volume de RCD gerado nessas cidades quanto pelo pequeno porte das áreas, situadas preferencialmente próximas das regiões geradoras dos resíduos. Uma solução definitiva precisaria, portanto, reduzir o volume de resíduos acumulados com o tempo com a reciclagem.

Em Hong Kong estima-se que, no ano de 2004, foram geradas cerca de 20 milhões de toneladas de RCD, o que representa um aumento de mais de 100% em um período de 10 anos (POON, 2007a). Em 2006, segundo um estudo publicado (POON, 2007b), 40% da capacidade disponível em aterros estavam preenchidas, indicando que em 5 a 9 anos os aterros estariam esgotados. Além do esgotamento dos aterros, outro grave problema é a deposição irregular desses resíduos. Em São Paulo o gasto com a retirada de RCD de depósitos ilegais chega a US\$ 9 milhões/ano (JOHN, ANGULO et al., 2004).

De maneira geral, a falta de fiscalização e o descaso tanto por parte das administrações municipais como da população são as maiores dificuldades no gerenciamento dos RCD no mundo todo. Para se elaborar planos eficazes de gerenciamento dos RCD, é fundamental que existam procedimentos pré-estabelecidos pelos órgãos responsáveis capazes de quantificar sua geração (PINTO e GONZALEZ, 2005; ANGULO, TEIXEIRA *et al.*, 2011).

Adicionalmente, no cenário mundial, verifica-se um movimento contrário à deposição de RCD em aterros sanitários. No Brasil, a resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 2002, foi criada com o objetivo de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos gerados pelas atividades relacionadas à construção, tais como a proibição da disposição destes em áreas não licenciadas, a atribuição da responsabilidade aos geradores, e obrigatoriedade da destinação a aterros específicos para a reutilização ou reciclagem futura.

Para a inserção de um programa de reciclagem de resíduos, a implantação da unidade recicladora é muito importante. Nesta fase, é fundamental conhecer o volume de geração de RCD possível de ser reciclado, o tipo de material, a aplicação pretendida e o local de instalação da unidade. O ideal é que as usinas estejam

próximas das fontes geradoras e dos locais de uso, ou seja, inseridas no contexto urbano (LIMA, 1999).

Em 2002, dos 5507 municípios brasileiros, apenas 12 (0,2%) possuíam centros de reciclagem de RCD (NUNES, MAHLER et al., 2007). Em 2008, 6 anos após resolução CONAMA 307, o número de usinas aumentou para 47, sendo cerca da metade de origem privada (Tabela 2.4). Esse aumento no número de usinas, contudo, ainda é muito insignificante perto do volume de RCD gerado. Para se ter uma ideia, mesmo considerando-se que todas as usinas existentes estivessem ativas e operando em sua capacidade máxima, apenas 4,5% de todo RCD produzido no país estaria sendo reciclado (MIRANDA, ANGULO et al., 2009).

A maioria das usinas de reciclagem de RCD, tanto no Brasil como em outros países, envolvem basicamente etapas de britagem (mandíbulas ou impacto), extração de sucatas e outros contaminantes orgânicos (extrator magnético e catação) e peneiramento a seco (ANGULO, ULSEN et al., 2009b; ULSEN, 2011), sendo o foco a produção de agregados graúdos.

Tabela 2.4 – Situação das usinas de reciclagem de RCD no Brasil em 2008 (MIRANDA, ANGULO *et al.*, 2009)

Estado	Cidade	Propriedade	Instalação	Cap.(t/h)	Situação
CE	Fortaleza	Usifort	2002	60	Operando
DF	São Sebastião	Adm. Regional	1999	5	Desativada
DF	Brasília	Caenge	2001	30	Operando
DF	Brasília	CAENGE	2008	30	Operando
MA	São Luís	Limpel	2008	40	Operando
MG	B. Horizonte (Estoril)	Prefeitura	1994	30	Operando
MG	B. Horizonte (Pampulha)	Prefeitura	1996	20	Operando
MG	Muriaé	Prefeitura	1997	08	Desativada
MG	B. Horizonte (BR040)	Prefeitura	2006	40	Operando
PB	João Pessoa	Prefeitura/Emlur	2007	25	Operando
PE	Petrolina	Prefeitura	2008	25	Instalando
PR	Londrina	Prefeitura	1993	20	Desativada
PR	Ponta Grossa	P. Grossa Amb.	2006	20	Operando
PR	Colombo	Soliforte	2007	40	Operando
PR	Londrina	Kurica Ambiental	2008	40	Operando
RJ	Macaé	Prefeitura	1998	08	Desativada
RJ	São Gonçalo	Prefeitura	2004	35	Paralisada
RJ	Rio das Ostras	Prefeitura	2007	20	Instalando
RS	Ciríaco	Prefeitura	2003	15	Desativada
RS	Santa Maria	GR2	2007	15	Operando
SP	São Paulo	Prefeitura	1991	100	Desativada
SP	Ribeirão Preto	Prefeitura	1996	30	Operando
SP	Piracicaba	Autarquia/Emdhap	1996	15	Operando
SP	São J. dos Campos	Prefeitura	1997	30	Desativada
SP	São Paulo	ATT Base	1998	15	Desativada
SP	Socorro	Irmãos Preto	2000	03	Operando
SP	Guarulhos	Prefeitura/Proguaru	2000	15	Operando
SP	Vinhedo	Prefeitura	2000	15	Operando
SP	Ribeirão Pires	Prefeitura	2003	15	Desativada
SP	Jundiaí	SMR	2004	20	Operando
SP	Campinas	Prefeitura	2004	70	Operando
SP	São B. do Campo	Urbem	2005	50	Operando
SP	São B. do Campo	Ecoforte	2005	70	Desativada
SP	São José do Rio Preto	Prefeitura	2005	30	Operando
SP	São Carlos	Prefeitura/Prohab	2005	20	Operando
SP	Taboão da Serra	Estação Ecologia	2006	20	Operando
SP	Caraguatatuba	JC	2007	15	Operando
SP	Limeira	RL Reciclagem	2007	35	Operando
SP	Americana	Cemara	2007	25	Operando
SP	Piracicaba	Autarquia/Semae	2007	20	Operando
SP	Osasco	Inst. Nova Agora	2007	25	Instalando
SP	São J. dos Campos	RCC Ambiental	2008	70	Operando
SP	Paulínia	Estre Ambiental	2008	100	Operando
SP	Guarulhos	Henfer	2008	30	Instalando
SP	Barretos	Prefeitura	2008	25	Instalando
SP	São José dos Campos	Julix - Enterpa	2008	25	Instalando
SP	Itaquaquecetuba	Entrec Ambiental	2008	40	Instalando

Os agregados de RCD apresentam uma distribuição granulométrica na qual aproximadamente metade da massa consiste em agregado miúdo, com granulometria abaixo de 4,8 mm (Figura 2.4), o qual não possui espaço significativo no mercado devido à cultura de que possuem uma baixa qualidade e elevado teor de contaminantes (ULSEN, KAHN *et al.*, 2005; POON e CHAN, 2007). Existem inclusive países nos quais o uso da fração fina é proibido, como China, Alemanha, Portugal, Espanha e Inglaterra (GONÇALVES e DE BRITO, 2010).

Figura 2.4 - Proporção de finos nas amostras estudadas (ULSEN, 2010)

Sendo assim, é de fundamental importância estabelecer métodos de processamento que visem à melhoria da qualidade desses produtos (ULSEN, 2011), uma vez que nenhuma usina é capaz de produzir apenas brita reciclada (MIRANDA, ANGULO *et al.*, 2009).

Outro ponto crítico referente às usinas de reciclagem é a falta de controle de qualidade. Não se tem notícias de usinas de reciclagem brasileiras que controlem a qualidade dos seus produtos (MIRANDA, ANGULO *et al.*, 2009).

O controle de qualidade é uma etapa extremamente importante para qualquer setor industrial, ainda mais quando se trata de RCD, que é um material composto por uma mistura de grande variabilidade de componentes construtivos originados de diferentes tipos de construções e demolições (ANGULO, 2005). Sendo assim, para que os agregados de RCD reciclados possam efetivamente ter espaço no mercado é preciso que exista um controle mínimo de qualidade (DAMINELLI, 2007a; MIRANDA, ANGULO *et al.*, 2009).

Na indústria mineral, o controle de qualidade, ou a avaliação da eficiência de uma rota de beneficiamento, é feito analisando-se a composição química da amostra antes e após o processamento (balanço metalúrgico), como ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Concentração de minérios (CHAVES, 1946)

De uma maneira simplificada, primeiramente avalia-se a quantidade do minério na amostra cabeça (antes do beneficiamento); esta é então comparada com a quantidade do minério presente no concentrado, após o beneficiamento, como exemplifica a Tabela 2.5 (parâmetros R , R_c , Y e R_e), tendo-se assim uma quantificação do quão eficiente foi a separação dos minerais no beneficiamento.

Tabela 2.5 – Equações de balanço de massa/metalúrgico (VALADÃO e ARAUJO, 2007)

Alimentação	$A = C + R$	$Aa = Cc + Rr$
Recuperação	$R = \frac{Cc}{Rr}$	$R = \frac{c(a - r)}{a(c - r)}$
Razão de concentração	$R_c = \frac{A}{C}$	
Recuperação mássica / rendimento	$Y = \frac{C}{A} = \frac{a - r}{c - r}$	
Relação de enriquecimento	$R_e = \frac{c}{a}$	
<div> <div> A = massa da alimentação C = massa do concentrado R = massa do rejeito </div> <div> a = teor do minério na alimentação c = teor do minério no concentrado r = teor do minério no rejeito </div> <div> R = recuperação do minério R_c = razão de concentração Y = recuperação mássica ou rendimento em massa R_e = razão de enriquecimento </div> </div>		

Porém, quando se trata de RCD, a dificuldade de se avaliar o processo de reciclagem trata-se da impossibilidade de diferenciar ou quantificar as fases presentes por meio de análises químicas ou mineralógicas. Para a fração graúda dos RCD a determinação da composição mineral é feita por meio da catação (seleção manual das fases presentes), o que é inviável quando se trabalha com a fração miúda.

Alguns autores realizaram alguns testes na tentativa de quantificar o teor de pasta de cimento remanescente, como o ataque ácido com concentração de 33% de HCl (QUARCIONI e CINCOTTO, 2006) e a soma dos teores de CaO com a perda ao fogo a 1050°C (ANGULO, 2005; ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009). No entanto, tanto o ataque ácido quanto a soma CaO+PF, são procedimentos restritivos quando há presença de agregados calcários. Os carbonatos são solubilizados pelo HCl e aumentam os teores de CaO e também da PF no agregado reciclado, de modo a superestimar o conteúdo de pasta de cimento presente.

De um modo geral, os métodos de caracterização de agregados reciclados oriundos de RCD baseiam-se essencialmente na determinação de propriedades físicas. Dentre os principais métodos pode-se citar: a determinação da proporção em massa das frações de concreto, alvenaria e cerâmica, além de contaminantes como

madeira, plástico, sucatas, etc., por meio da catação (DIN, 2002); medida de algumas propriedades físicas fundamentais como densidade aparente, proporção em massa de material com densidade abaixo de um valor específico (RECOMMENDATION, 1994) e absorção de água (HENDRIKS, 2000; ABNT, 2004), como ilustra a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Panorama dos requisitos para utilização dos agregados reciclados (GONÇALVES e DE BRITO, 2010).

País	Classificação	Densidade aparente Mínimo (g/cm³)	Absorção de água Máxima (%)
Brasil	ARCon	n.d	7
	ARM	n.d	12
Alemanha	ARCon	2	10
	ARCon	2	15
	ARAI	1,8	20
	ARM	1,5	n.d
Hong-Kong	ARCon	2	10
Japão	ARM	2,2	7
RILEM	ARCon	2,4	3
	ARAI	1,5	20
Inglaterra	ARCon	n.d	n.d
	RA	n.d	n.d
Holanda	ARCon	2	n.d
	ARAI	2	n.d
Portugal	ARCon	2,2	7
	ARCon	2,2	7
	ARM	2	7
Suíça	ARCon	n.d	n.d
	ARM	n.d	n.d
Dinamarca	ARCon with testing	2,2	n.d
	ARM	1,8	n.d

**n.d. = não disponível*

ARCon = agregado reciclado de concreto

ARAI = agregado reciclado de alvenaria

ARM = agregato reciclado misto (concreto+alvenaria)

2.2.3 Aplicações

Os agregados reciclados são utilizados de acordo com suas propriedades (granulometria, absorção de água, densidade, etc.), as quais, por sua vez, são determinadas pelo tipo de processamento à que são submetidas. Dessa forma, o

processo de produção de agregados reciclados é essencial e determinante na qualidade dos agregados gerados (YAGISHITA, SANO et al., 1994; TOMOSAWA, NOGUCHI et al., 2005).

A Tabela 2.7 apresenta um sumário das aplicações regulamentadas em alguns países.

Tabela 2.7 – Panorama das aplicações dos agregados reciclados (GONÇALVES e DE BRITO, 2010).

País	Classificação	Substituição máxima (%)		Condições de uso	Máxima classe de resistência
		gráudo	miúdo		
Brasil	ARCon ARM	100	100	concreto sem função estrutural	15 MPa
Alemanha	ARCon	20-35	0	X0, XC1 a XC4, XF1 a XF3, XA1	C30/37 (100%) e C25/30 (20%)
	ARCon ARAI	n.d	n.d	concreto sem função estrutural	
Hong-Kong	ARCon	20 ou 100	0	concreto estrutural ou concreto sem função estrutural	20 MPa (100%) e 35 MPa (20%)
Japão	ARM	100	100	fundações ou aplicações menos exigentes do ponto de vista mecânico	18 MPa
RILEM	ARCon	100	apenas se passar nos mesmos requisitos de uma areia natural	ambientes sem condições extremas (muito secos ou muito úmidos)	sem limite
	ARAI				C16/20
Inglaterra	ARCon	20	0	X0, XC1 a XC4, XF1, DC-1	C40/50
	RA	n.d	0	concreto sem função estrutural	
Holanda	ARCon	100	apenas se utilizado com agregado gráudo natural	ambientes sem condições extremas	C40/50
	ARAI				C20/25
Portugal	ARCon	25	0	X0, XC1 a XC4, XS1, AX1	C40/50
	ARCon	20	0		C35/45
	ARM	n.d	0	concreto sem função estrutural	
Suíça	ARCon	100	100	concreto armado	C30/37
	ARM			não permitido em concreto armado	
Dinamarca	ARCon with testing ARM	100	20	ambientes sem condições extremas	40 MPa

*n.d. = não disponível

ARCon = agregado reciclado de concreto

ARAI = agregado reciclado de alvenaria

ARM = agregato reciclado misto (concreto+alvenaria)

No Brasil a norma NBR 15116:2004 (ABNT, 2004) permite o uso de agregados reciclados em concretos sem função estrutural, sendo utilizada tanto a fração graúda quanto a miúda. Na Alemanha a norma DIN 4226-100 (DIN, 2002) especificava que agregados reciclados com densidade aparente de $1,5 \text{ g/cm}^3$ ou maior podiam ser utilizados em argamassas e concretos. Inicialmente, tanto a fração graúda quanto a miúda podiam ser utilizadas, porém, em 2004 o Comitê Alemão de Concreto proibiu a utilização de areia reciclada em concreto (GRUBL e RUHL, 1998). Para situações que exigem um menor desempenho mecânico permite-se a utilização de 25% a 35% de agregado graúdo reciclado.

A norma portuguesa LNEC (LNEC, 2006) é similar à alemã, regulamentando a utilização de agregados reciclados graúdos em concretos. Agregados reciclados de alvenaria podem ser utilizados em concretos sem função estrutural; já os RCD de concreto podem substituir até 25% dos naturais em concretos de 40 MPa de resistência.

Em Hong Kong permite-se apenas a utilização da fração graúda dos agregados reciclados em concretos, podendo ser realizadas substituições de 20% e 100% (WBTC, 2002). No primeiro caso (substituição de 20% dos agregados graúdos naturais pelos reciclados), podem ser feitos concretos estruturais de até 35 MPa de resistência; já no segundo, apenas concretos sem função estrutural de até 20 MPa de resistência.

Apesar de diversas normas regulamentarem a substituição parcial em concretos, a principal aplicação para os agregados reciclados é em atividades de nivelamento (POON e CHAN, 2007; LI, 2009), no entanto, esse mercado poderia consumir no máximo 50% do total produzido (HENDRIKS, 2000; ANGULO, 2003b); dessa forma há uma necessidade crescente em utilizá-los em outras aplicações, especialmente em aplicações mais nobres, como argamassas e concretos (ANGULO, 2002a). Para tanto são necessárias melhorias na gestão dos resíduos, nas ferramentas de controle de qualidade e na tecnologia de beneficiamento (ANGULO, 2002a; ANGULO, 2005; ULSEN, 2006).

2.3 PROCESSAMENTO MINERAL APLICADO À RECICLAGEM DE RCD

Diferentes estratégias foram estabelecidas para melhorar a qualidade (reduzir o conteúdo de fases porosas) dos resíduos de construção e demolição, como a

implementação de operações de triagem em concreto (para concentrar materiais com a menor porosidade dentre os resíduos de construção e demolição) e resíduos não minerais (para minimizar a heterogeneidade na sua origem) (HENDRIKS, 2004), substituição parcial de agregados naturais por reciclados em até 20% em concretos (RECOMMENDATION, 1994; GOMEZ-SOBERON, 2002) ou a remoção da pasta de cimento aderida aos agregados reciclados através de operações de cominuição otimizadas ou tratamento térmico (LINSS e MUELLER, 2004; NAGATAKI, GOKCE et al., 2004; SHIMA, TATEYASHIKI et al., 2005) o que leva a agregados de porosidade bem semelhante à de agregados naturais (possibilidade de substituição total em concretos).

Contudo, o foco desses estudos é a produção de agregados graúdos, sendo a fração miúda usualmente descartada como resíduo da própria reciclagem. Além disso, a liberação de materiais, que depende muito do tamanho das partículas, raramente é discutida nesses estudos (TOMAS, SCHREIER et al., 1999; LEE, KWON et al., 2008).

No setor mineral, para que uma determinada técnica de classificação seja eficiente são necessários dois passos importantes: liberação e separação. Liberação ocorre quando fases diferentes são eficientemente separadas, desapegadas umas das outras. Se a liberação não for realizada com sucesso a separação torna-se inviável, o que significa que é necessária uma liberação razoável para se obter uma boa separação (GAUDIN, 1932). .

2.3.1 Produção de areia reciclada

Apesar da fracção miúda ser considerada como um agregado de baixa qualidade (muito poroso e de forma irregular), estudos recentes vem mostrando o contrário (MUELLER e STARK, 2005; ULSEN, HAWLITSCHKEK *et al.*, 2010). Nesse contexto, uma pesquisa inovadora desenvolvida por Ulsen e colaboradores (ULSEN, KAHN *et al.*; ULSEN, 2006; ULSEN, HAWLITSCHKEK *et al.*, 2010; ULSEN, 2011; ULSEN, KAHN *et al.*, 2013) na qual o foco da reciclagem era essencialmente a produção de areia reciclada, mostrou que a liberação das fases dos RCD ocorre para as frações mais finas, abaixo de 4,8 mm.

A Figura 2.6 apresenta as curvas de separabilidade por densidade, com valores acumulados nos produtos afundados, de RCD de diferentes cidades do estado de São Paulo (ULSEN, 2006).

A separação em líquido denso baseia-se na capacidade ou não de sedimentação das partículas quando imersas em líquido de uma dada densidade (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997). A grande vantagem das separações em líquidos densos é a sua eficiência que permite realizar separações próximas da ideal mesmo para uma população de partículas de massas específicas próximas.

Figura 2.6 – Curvas de separabilidade para RCD de diferentes origens (ULSEN, 2006)

A distribuição em massa acumulada nos produtos afundados mostra que as frações acima de 12,7 mm apresentam menor proporção de material afundado na separação em líquido com densidade de 2,2 g/cm³. Essa proporção aumenta nas frações mais finas, especialmente abaixo de 4,8 mm, indicando uma maior liberação

da fração mineral de interesse (agregados naturais pré-existent e com baixo teor de pasta de cimento aderida).

Do ponto de vista do processamento, a principal vantagem na produção de agregados miúdos reciclados, ao invés de grãos, deve-se ao fato de que a cominuição em agregados mais finos possibilita a geração de maior número de partículas livres de pasta de cimento, compostas exclusivamente por fases minerais (esquema ilustrativo na Figura 2.7).

Figura 2.7 – Ilustração do efeito da britagem na liberação entre as fases de rochas e a pasta de cimento na produção de agregado miúdo reciclado (ULSEN, 2011)

2.3.1.1 Britagem

Após a verificação da faixa granulométrica na qual ocorre a liberação das fases, foi avaliada a utilização de britador de impacto vertical (VSI – Vertical Shaft Impactor) para a cominuição de todo RCD em granulometria de areia (ULSEN, 2011; ULSEN, KAHN *et al.*, 2013). A produção de areia artificial (gerada pela britagem de rochas) tem sido realizada por britagem de impacto vertical (VSI – Vertical Shaft Impactor) desde os anos 90.

A utilização do VSI é principalmente recomendada para produção de areia de brita tipicamente abaixo de 4,8 mm (areia grossa) ou 2,4 mm (areia média), por gerar um produto com partículas mais esféricas e arredondadas, conferindo ao concreto melhor trabalhabilidade (ANGULO, CHAVES *et al.*, 2005).

Outro diferencial é o acúmulo de material dentro da própria câmara de britagem, útil para promover o impacto de rocha contra rocha e minimizar o desgaste dos revestimentos (FAÇO, 1994). A Figura 2.8 apresenta um esquema do funcionamento deste equipamento.

Figura 2.8 - Esquema de funcionamento do britador VSI (METSO, 2005)

O material alimentado pelo topo da máquina é acelerado pelo rotor atingindo altas velocidades periféricas (até 105 m/s em alguns modelos). Com a utilização, o eixo rotor e a câmara de britagem ficam revestidos por rochas, atuando como uma bomba de pedras a alta velocidade que arremessa um fluxo contínuo de rocha contra rocha.

O rotor descarrega continuamente o material em uma cortina de partículas em alta turbulência formada dentro da câmara de britagem onde a cominuição ocorre por impacto, atrito e abrasão de rocha contra rocha (FAÇO, 1994). Esse mecanismo de quebra é especialmente vantajoso para os RCD, uma vez que a quebra por abrasão promove uma maior liberação da pasta de cimento aderida a superfície das partículas.

As principais vantagens operacionais do britador VSI são os baixos custos de manutenção, a capacidade de se controlar a granulometria do produto sem que ocorra geração excessiva de finos, grande eficiência na liberação e a possibilidade de operação com materiais abrasivos. Por outro lado, a principal desvantagem é o elevado custo inicial (CHAVES e PERES, 2006).

Esses ensaios (Figura 2.9) mostraram que o RCD britado em uma granulometria de areia (VSI-55, VSI-65 e VSI-75) resultou em uma areia reciclada com distribuição granulométrica bastante semelhante à fração areia presente no RCD inicial (TQ_areia), ou seja, não ocorreu uma geração excessiva de finos mesmo nas condições mais severas de britagem (ULSEN, KAHN *et al.*, 2013).

TQ: RCD amostrado na usina de reciclagem

TQ areia: fração areia (-4,8 mm) da amostra TQ

VSI-55: amostra TQ britada em VSI com uma velocidade de 55 m/s do rotor

VSI-65: amostra TQ britada em VSI com uma velocidade de 65 m/s do rotor

VSI-75: amostra TQ britada em VSI com uma velocidade de 75 m/s do rotor

Figura 2.9 - Distribuições granulométricas comparativas de RCD britados em VSI sob diferentes rotações do equipamento (ULSEN, KAHN *et al.*, 2013)

Os resultados das separações em líquido denso das areias produzidas em comparação com a amostra de RCD inicial são apresentados na Figura 2.10. As areias recicladas cominuídas no VSI, comparadas à areia da amostra tal qual (TQ-areia),

demonstram que a liberação da pasta de cimento é favorecida pelo método de cominuição aplicado.

Figura 2.10 - Distribuição de agregados miúdos reciclados nos produtos de densidade da separação em líquidos densos (ULSEN, KAHN *et al.*, 2013)

O aumento da velocidade do rotor do VSI de 55 para 65 m/s reduz o conteúdo de fases porosas (aumento da proporção em massa no produto pesado), no entanto o aumento de 65 para 75 m/s gera um produto semelhante com relação à proporção de produto pesado.

Adicionalmente, a parcela dos produtos de maior densidade aumenta para as frações mais finas, abaixo de 1,2 mm. Novamente, demonstra-se que a liberação da pasta de cimento ocorre preferencialmente nas frações mais finas, com o decréscimo da proporção de fases porosas. Desse modo, o maior potencial de recuperação em massa de um produto com menor teor de fases porosas encontra-se na faixa granulométrica -1,2+0,15 mm.

2.3.1.2 Separações minerais

Complementamente a etapa de britagem, nos estudos realizados por Ulsen e colaboradores (ULSEN, KAHN *et al.*; ULSEN, 2011) foram também avaliados diversas técnicas de separações minerais. Esses produtos gerados nas diferentes técnicas de beneficiamento mineral estudadas apresentaram características semelhantes à areias naturais, indicando um potencial de utilização em aplicações mais nobres.

Dentre os processos avaliados destaca-se a separação magnética, a qual, além de ser uma operação que não utiliza água no seu processo, mostrou-se bem seletiva na separação do cimento.

As curvas de separabilidade magnética dos produtos oriundos das separações em líquido denso, realizadas em separador Frantz de barreiras (PARFENOFF, POMEROL *et al.*, 1970; JONES, 1987), são apresentadas na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Curvas de separabilidade magnética por classe de densidade (ULSEN, KAHN *et al.*)

Os produtos leves ($d < 2,5 \text{ g/cm}^3$), com elevado teor de pasta de cimento e fases porosas, possuem um comportamento notavelmente inverso ao dos produtos pesados ($d > 2,5 \text{ g/cm}^3$), com menor teor de fases porosas. Enquanto os produtos leves apresentam uma elevada proporção em massa (cerca de 90%) concentrada no produto magnético, os produtos pesados possuem apenas cerca de 20%, em massa. Dessa forma, foi verificado que as fases porosas enriquecidas em pasta de cimento concentram-se majoritariamente no produto magnético.

Com o potencial de separabilidade por meio da susceptibilidade magnética confirmado, foi avaliada a separação em um equipamento de escala industrial: separador magnético de rolo de terras raras (RE-ROLL). O equipamento é constituído por um alimentador vibratório de 10 cm, 4 polegadas e dois divisores ajustáveis que permitem a obtenção de três produtos: magnético, misto e não magnético. Um esquema ilustrativo do equipamento é apresentado na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Separador magnético por rolo de terras raras (REROLL)

Diversas condições operacionais foram avaliadas, sendo a configuração final, a qual resultou em uma maior recuperação em massa (60%, em massa, de produto não magnético) e um produto de menor porosidade (redução de cerca de 60%), apresentada na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Condições operacionais do REROLL para separação de areia reciclada (ULSEN, 2011)

Taxa de alimentação (kg/h.pol)	Rotação (rpm)
12	115

Contudo, a aceitação deste material em aplicações na construção civil, como argamassas e concretos, ainda é uma barreira, principalmente pela ausência de normas regulamentadoras e procedimentos de caracterização dos produtos gerados. Como dito anteriormente, não é possível avaliar a eficiência do beneficiamento mineral na redução das fases porosas (enriquecidas em pasta de cimento) por meio de análises químicas e mineralógicas devido à presença de inúmeros materiais na composição dos RCD.

Considerando os demais tipos de beneficiamento mineral que foram avaliados por Ulsen (ULSEN, 2011) e outros que possam a vir ser estudados, o principal parâmetro que diferencia os produtos gerados nos processamentos é a sua

porosidade/absorção de água. Sendo assim, para que se possa compreender qual a rota de reciclagem mais apropriada, é preciso antes compreender até que ponto a porosidade/absorção de água do agregado miúdo reciclado influencia na sua aplicação, seja ela qual for.

Para que seja possível implementar uma usina de reciclagem e realizar um controle de qualidade eficiente, capaz de avaliar a qualidade (teor de fases porosas) dos agregados reciclados produzidos, é preciso que tenha-se um ou mais parâmetros críticos no desempenho desse material em argamassas e concretos e uma metodologia eficiente para a quantificação destes.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS MIÚDOS

2.4.1 Distribuição granulométrica

Na área de agregados e materiais cimentícios, sobretudo quando se considera a produção de argamassas e concretos, caracterizar a morfologia e a distribuição granulométrica de partículas é uma demanda de extrema importância. Isto porque tais características físicas influenciam diretamente no comportamento no estado fluido e no estado endurecido desses materiais (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000) sendo, portanto, fundamentais nos procedimentos de formulação de composições (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000).

A distribuição granulométrica é um fator extremamente importante para os agregados, uma vez que influenciam diretamente no comportamento reológico do sistema e, conseqüentemente, no desempenho de argamassas e concretos (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000). No caso dos agregados reciclados a granulometria influencia em outros parâmetros importantes, como a composição química e mineralógica (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009), o teor de pasta de cimento aderida (DE JUAN e GUTIERREZ, 2009), a absorção de água e a distribuição nos produtos de densidade (ULSEN, 2006).

Distribuições granulométricas estreitas (Figura 2.13a) aumentam os espaços vazios entre as partículas; já distribuições granulométricas mais amplas (Figura 2.13b) possibilitam que os espaços vazios sejam preenchidos por partículas menores, aumentando assim a densidade de empacotamento e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade água necessária para preencher os espaços vazios (PILEGGI, 2001).

Figura 2.13 – Efeito da distribuição granulométrica das partículas na densidade de empacotamento (PILEGGI, 2001))

Na literatura existem basicamente dois tipos de abordagem quando se trata de empacotamento de partículas, uma discreta, que considera as partículas individualmente, e outra contínua, que considera as partículas como distribuições contínuas, sendo esta última a mais aceita e utilizada uma vez que em distribuições reais de partículas todos os diâmetros podem estar presentes (PILEGGI, 2001).

Na abordagem contínua, o empacotamento máximo é definido matematicamente como uma lei de potências (Figura 2.14). Nessa abordagem existe o modelo de empacotamento ideal, descrito por Andreasen, no qual o máximo empacotamento ($q = 0,37$) ocorreria somente quando o diâmetro mínimo fosse zero, o que não acontece na prática. No modelo de Alfred foi introduzido o conceito de tamanho mínimo de partícula ao modelo de Andreasen, tornando-o assim mais próximo da realidade (FUNK e DINGER, 1992a; FUNK e DINGER, 1992b; FUNK e DINGER, 1994a) e permitindo calcular o empacotamento máximo dentro de um intervalo granulométrico definido.

Figura 2.14 – Comparação dos modelos de empacotamento de distribuições contínuas

2.4.1 Morfologia de partículas

De uma maneira geral, agregados com morfologia irregular elevam o consumo de água para que se atinja o comportamento reológico adequado para aplicação e moldagem desses materiais; como consequência, maiores teores de cimento são necessários para garantir o desempenho do produto. Adicionalmente, grãos angulosos pioram a trabalhabilidade (DAVISON, 1974; PILEGGI, 2001), propriedade mais importante das argamassas no estado plástico, bem como a resiliência (elasticidade), enquanto que grãos menos angulosos, com menor superfície específica, melhoram a trabalhabilidade das argamassas (SABBATINI, 1986; GUIMARÃES, 1998; D'AGOSTINO, 2004).

Segundo procedimentos especificados em normas internacionais e nacionais, a morfologia das partículas é avaliada através da determinação do maior e menor diâmetro de cada partícula.

Para agregados graúdos utiliza-se um paquímetro em amostras de até 32 kg, dependendo da faixa granulométrica, de acordo com a norma NBR 7809 (ABNT, 2008). Já para agregados miúdos, podem-se citar análises de imagens a partir do processamento de imagens previamente adquiridas, conforme procedimentos da norma ISO 13322-1/04 (ISO, 2004), na qual as partículas são dispostas sobre uma superfície plana, suportes ou laminas e adquiridas através de microscopia óptica ou eletrônica de varredura (procedimento utilizado em agregados miúdos).

Esses métodos são extremamente morosos, imprecisos e possuem baixa reprodutibilidade e representatividade, uma vez que dependem do operador e a

análise de um número significativo de partículas levaria um tempo extremamente elevado (AL-ROUSAN, MASAD *et al.*, 2007). Com isso, a morfologia das partículas era avaliada muito mais de maneira qualitativa, por meio da comparação visual das partículas com gabaritos preestabelecidos, como mostra a Figura 2.15.

Figura 2.15 - Gabarito para a avaliação visual da esfericidade e arredondamento das partículas (KRUMBEIN e SLOSS, 1956)

Outra dificuldade na determinação da morfologia das partículas é a enorme quantidade de diferentes termos e definições dos parâmetros de forma. Pode haver pequenas diferenças entre os cálculos dos parâmetros de forma para os diferentes sistemas existentes, como por exemplo, um ser o inverso do outro ou acrescido de algum fator invariável. Um sumário com os parâmetros de forma definidos por alguns autores é apresentado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Parâmetros de feições morfológicas de partículas

Parâmetro	Fórmula
Fator de forma <i>Form factor</i>	$\frac{4 \times \pi \times \text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \text{ (RUSS, 2007)}$
Arredondamento <i>Roundness / Circularity</i>	$\frac{\text{Perímetro}^2}{4 \times \pi \times \text{Área}} \text{ (ALLEN, 1997)}$ $\frac{4 \times \text{Área}}{\pi \times \text{Diâmetro}_{\text{max}}^2} \text{ (RUSS, 2007)}$ $\frac{\text{media do raio das arestas da partícula}}{\text{raio da maior circunferência inscrita}} \text{ (KRUMBEIN e SLOSS, 1956)}$
Esfericidade <i>Sphericity/ Equidimensionality</i>	$\Psi = \left(\frac{\text{Diâmetro}_{\text{vol}}}{\text{Diâmetro}_{\text{área}}} \right)^2 \text{ (ALLEN, 1997)}$ <p><i>Diâmetro vol = diâmetro de uma esfera de igual volume ao da partícula; Diâmetro área = diâmetro de uma esfera de mesma área que a partícula.</i></p> $L/B = \frac{\text{Diâmetro}_{\text{max.}}}{\text{Diâmetro}_{\text{min.}}} \text{ (KRUMBEIN e SLOSS, 1956)}$ $\frac{\text{Perímetro}^2}{4 \times \pi \times \text{Área}} \text{ (equipamento CAMSIZER)}$
Relação de aspecto <i>Aspect ratio</i>	$L/B = \frac{\text{Diâmetro}_{\text{max.}}}{\text{Diâmetro}_{\text{min.}}} \text{ (RUSS, 2007)}$ <p><i>L = length (maior diâmetro); B = breadth (menor diâmetro)</i></p> $\frac{b}{l} = \frac{\text{menor diametro (x_min)}}{\text{maior diametro (Fe_max)}} \text{ (equipamento CAMSIZER)}$

Atualmente, com o surgimento de equipamentos de análise de imagens dinâmica tem-se a possibilidade de caracterização dos parâmetros geométricos através da análise de imagens por fluxo de partículas, possibilitando a análise de dezenas de milhares até milhões de partículas em poucos minutos. Este método é regulamentado pela norma ISO 13322-2/06 (ISO, 2006), sendo muito mais preciso e representativo do que os anteriores e com uma excelente reprodutibilidade. Alguns

destes equipamentos são o QICPIC (Sympatec²), Camsizer (Retsch Technology³), CPA (Haver & Boecker⁴) e RapidVue (Beckman Coulter⁵).

O CAMSIZER é um equipamento óptico-eletrônico que mede tamanho e forma de partículas através da análise dinâmica de imagens (2D). O sistema de funcionamento (Figura 2.16) é relativamente simples: o material passa por uma área onde existe uma fonte de luz LED e duas câmeras que captam as imagens (cerca de 70 imagens por segundo no CAMSIZER-L e 170 no CAMSIZER-XT), sendo estas processadas pelo software do equipamento.

As informações obtidas pelas câmeras são então combinadas através de algoritmos, gerando informações precisas e com excelente reprodutividade. São atualmente comercializados dois modelos, o CAMSIZER L, que realiza análises de material em queda livre (material seco) e possui limite analítico de 30 µm a 30 mm e o CAMSIZER-XT, que opera com material seco e também em meio aquoso (<0,6 mm), com alcance de 1 µm a 3 mm.

² <http://www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/QICPIC.html>

³ <http://www.retsch-technology.com/rt/products/digital-image-processing/camsizer/function-features/>

⁴ <http://www.weavingideas.net/us/applications-products/particle-analysis-photo-optical/haver-cpa-models/haver-cpa-3-2.html>

⁵ <http://www.beckmancoulter.com/coultercounter/showDoc/doc.do?filename=&fileid=10124>

Figura 2.16 - Esquema de funcionamento do analisador de imagens por fluxo dinâmico, modelo Camsizer-L

Uma das grandes vantagens do equipamento é que o próprio sistema gera um algoritmo de correlação entre os resultados obtidos e resultados de peneiramento, técnica vital no mundo da mineração e que, de modo geral, demanda um tempo longo de trabalho. Uma vez criado um banco de dados robusto para cada tipo de amostra, contendo informações da distribuição granulométrica determinada por ambas as técnicas, elimina-se a necessidade do peneiramento rotineiro para análise granulométrica.

Destaca-se ainda o fato de o software controlar praticamente todas as operações, restringindo operações manuais e, conseqüentemente, diminuindo o erro humano. Além disso, o sistema é capaz de analisar centenas de milhares a milhões de partículas em poucos minutos, gerando resultados robustos e estatisticamente mais representativos.

O equipamento Camsizer realiza a análise morfológica em 2D segundo diversos parâmetros, entre eles os mais utilizados na indústria mineral são: diâmetro mínimo ($x_{\min}$), área equivalente (x_{area}) e diâmetro de Ferret máximo ($Fe_{\max}$), como ilustrado na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Parâmetros considerados em medidas de tamanho de partículas por análise de imagens

Para a determinação da distribuição de tamanho de partículas, o algoritmo faz uma ponderação por volume, calculada a partir da projeção da partícula (2D). Para isso o programa utiliza o x_{area} (Equação 1) e calcula o volume da esfera equivalente para cada partícula.

$$x_{area} = \sqrt{\frac{4(\text{área da partícula})}{\pi}}$$

Equação 1 – x_{area}

Também são diversos os parâmetros de forma caracterizados, contudo, os principais a serem estudados são a esfericidade (Equação 2) e a razão entre o menor e o maior diâmetro das partículas (b/l , Equação 3):

$$esf. = \frac{4\pi(\text{área da partícula})}{(\text{perímetro da partícula})^2}$$

Equação 2 - Esfericidade

$$b/l = \frac{x_{min}}{Fe_{max}}$$

Equação 3 - Relação de aspecto

Uma ilustração de partículas com diferentes morfologias, obtidas pelo CAMSIZER é apresentada na Figura 2.18. Nessa figura, todas as partículas referem-se a areias comercializadas no Estado de São Paulo.

A relação de aspecto é de fácil visualização, quanto menores os valores de b/l mais alongadas serão as partículas e quanto mais próximos de 1, mais próximas de

uma esfera serão. Já a interpretação do parâmetro esfericidade, não é tão trivial. Observando as partículas com valores próximos de relação de aspecto e esfericidades diferentes, nota-se que o parâmetro esfericidade está mais relacionado com a angulosidade da partícula, a irregularidade do seu perímetro projetado, ou seja, com o arredondamento da partícula. Nota-se também certa correlação da esfericidade com a relação de aspecto (b/l).

Figura 2.18 – Correlação entre a relação de aspecto (b/l) e a esfericidade de areias comerciais (medidas do equipamento CAMSIZER)

Como dito anteriormente, os parâmetros de forma (esfericidade e relação de aspecto), do modo como são calculados, apresentam uma pequena variação (entre 0 e 1). Desse modo, é preciso compreender o impacto que essas pequenas variações têm na forma das partículas.

A Figura 2.19 apresenta uma ilustração da relação de aumento do comprimento da partícula e relação a sua altura para pequenas variações do parâmetro b/l (relação de aspecto). Nota-se que pequenas diferenças, de 0,05, na relação de aspecto representam um aumento significativo no alongamento da partícula.

Figura 2.19 – relação entre o menor e o maior diâmetro da partícula para diferentes valores de b/l (relação de aspecto)

2.4.2 Porosidade e área de superfície específica

A absorção de água é a propriedade que mais diferencia os agregados reciclados dos naturais (HANSEN, 1986) e está diretamente relacionada à porosidade do agregado reciclado devido ao teor de pasta de cimento aderida (CHEN, YEN *et al.*, 2003). Agregados naturais oriundos de britagem de rochas possuem porosidade muito baixa ou nula, o que implica em baixa ou nenhuma absorção de água. Já os agregados reciclados podem apresentar elevada taxa de absorção em função do teor de pasta de cimento aderida a superfície das partículas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Maiores porosidades resultarão em menores resistências mecânicas, aumento da absorção de água e consumo de cimento para uma dada resistência, elevando custos e comprometendo a ecoeficiência dos agregados reciclados (GOMEZ-SOBERON, 2002; POON, SHUI *et al.*, 2004).

A determinação da absorção de água segundo as normas brasileiras NM 30, NM 53 e BSI-BS 812 (ABNT, 1987; BSI, 1990; ABNT, 2001) e internacionais seguem procedimentos similares, os quais envolvem a determinação da massa seca do agregado (Figura 2.20a), saturada com água livre (Figura 2.20b) e na condição do agregado saturado com superfície seca (Figura 2.20c).

Figura 2.20 - Condições de umidade de agregados⁶

O método proposto pelas normas apresenta dificuldades na caracterização de agregados reciclados visto que foi desenvolvido para caracterizar agregados naturais de baixa porosidade. Dentre estas citam-se: método moroso (média de 48 h por ensaio), dificuldade de saturação dos poros (LEITE, 2001), desagregação do material (CARRIJO, 2005) e, principalmente, imprecisão na determinação da condição de superfície saturada seca.

A massa específica aparente (MEA) é um parâmetro utilizado para a determinação da porosidade dos agregados reciclados, juntamente com a massa específica real (MER), facilmente determinada por picnometria por intrusão de gás hélio. Logo, a determinação da porosidade enfrenta também as imprecisões e dificuldades referentes às medidas da massa na condição de superfície saturada seca ($\text{Porosidade} = 1 - \text{MEA}/\text{MER}$).

Tais dificuldades, somadas às imprecisões das medidas e dificuldades em obter resultados repetitivos, têm levado pesquisadores a desenvolver métodos alternativos para as medidas de absorção de água (LEITE, 2001; DIAS e AGOPYAN, 2005; KROPP, 2005; DAMINELLI, 2007b; TAM, GAO *et al.*, 2008). Destes, destaca-se o procedimento elaborado por Daminelli (DAMINELLI, 2007b), que permite maior agilidade nos ensaios e maior repetitividade de resultados a partir da secagem das amostras em forno micro-ondas.

A determinação da porosidade, alternativamente às técnicas convencionais de caracterização de agregados, pode ser realizada por porosimetria com intrusão de

⁶ Imagens de: http://training.ce.washington.edu/pgi/Modules/03_materials/03-2_body.htm

mercúrio. Embora pouco aplicada a agregados reciclados, é a técnica mais importante para a determinação de porosidade de materiais (WEBB e ORR, 1997). Em uma única medida de duração por volta de 60 minutos é possível determinar a porosidade da amostra, a distribuição do tamanho de poros, do volume total de poros, densidade aparente e área específica do material.

Esta técnica é mencionada por Poon (POON, SHUI *et al.*, 2004) na comparação de agregados naturais, agregados reciclados de concreto convencional e agregados reciclados de concreto de alto desempenho. Os resultados comprovaram que agregados reciclados de concretos de alto desempenho apresentam porosidade intermediária (cerca de 7%), entre a porosidade dos agregados naturais (1,6%) e dos reciclados de concreto convencional (quase 17%), confirmando que a porosidade da pasta de cimento presente no agregado reciclado depende das características do resíduo processado.

2.5 REOLOGIA APLICADA EM ARGAMASSAS

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação resultantes dos materiais quando submetidos a forças externas ao longo do tempo (MALKIN, 1994). A resistência de um fluido a deformação (viscosidade) é definida, segundo Newton, tal como expresso na (Equação 4).

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \gamma \quad (\text{Equação 4})$$

F = força (N)
 A = área (m²)
 η = viscosidade (Pa.s)
 γ = taxa de cisalhamento (s⁻¹)
 t = tensão de cisalhamento (N/m²=Pa)

Os fluidos que obedecem a esta equação são chamados “fluidos newtonianos”, para os quais a viscosidade é uma característica intrínseca que depende, basicamente, da temperatura e da pressão, esta última de forma menos significativa.

Os fluidos que não apresentam essa relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento são chamados “fluidos não-newtonianos”. Para estes, a viscosidade deixa de ser uma característica intrínseca do fluido e passa a depender da taxa de cisalhamento e diversos outros fatores, dentre eles: a concentração de sólidos e suas características físicas (distribuição granulométrica e morfológica, porosidade, superfície específica), as características do meio líquido, temperatura, reatividade do

meio e, para o caso de suspensões reativas como argamassas, tempo de mistura (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000).

A presença de partículas em um fluido em movimento perturba o perfil de escoamento (Figura 2.21), fazendo assim com que a viscosidade do meio aumente. Quanto maior essa perturbação, maior será a viscosidade (PILEGGI, 2001). Desse modo, considerando que as argamassas possuem uma alta concentração de sólidos (por volta de 80%), as características das partículas utilizadas têm uma elevada influência no comportamento reológico da suspensão.

Figura 2.21 – Representação esquemática da perturbação pela presença de partículas imersas entre as linhas de fluxo do líquido sob cisalhamento (PILEGGI, 2001)

Adicionalmente, a aglomeração das partículas pode formar uma estrutura espacial rígida, originando uma tensão mínima de cisalhamento; a qual consiste na mínima tensão de cisalhamento capaz de iniciar o escoamento da suspensão.

Dentre os comportamentos não-lineares dos fluidos pode-se destacar a pseudoplasticidade e a dilatância. A pseudoplasticidade é caracterizada pela redução da viscosidade com o aumento da taxa/tensão de cisalhamento. Para o caso de suspensões com alta concentração de sólidos, esse comportamento é, na maioria das vezes, causado principalmente pelo tipo de interação (atração ou repulsão) entre as partículas (PILEGGI, 2001).

Já a dilatância consiste no aumento da viscosidade juntamente com a taxa/tensão de cisalhamento, sendo este comportamento típico de suspensões

concentradas. Existem diversos fatores que podem dificultar o deslocamento entre as partículas no fluido, contribuindo assim para o comportamento dilatante, como a presença de partículas com elevada superfície específica e formas assimétricas (PILEGGI, 2001), características estas comuns nos RCD.

Conforme explicado anteriormente, a distribuição granulométrica e a forma das partículas são características que controlam o empacotamento, ou seja, o espaço vazio entre as partículas. Sendo assim, influem diretamente na reologia, uma vez que primeiramente é necessária uma quantidade de água capaz de preencher esses vazios, recobrir a superfície das partículas e então separá-las para que elas fluam com a facilidade desejada. Esta distância de separação é ilustrada na Figura 2.22.

Figura 2.22 – Ilustração do conceito de distância média de separação entre partículas (PILEGGI, 2001)

Existem modelos para calcular esta distância em suspensões, denominada IPS (Interparticle Separation Distance), dentre os quais destacam-se os de De Hoff e Rhines (AGARWALA, PATTERSON *et al.*, 1992) e o de Funk e Dinger (FUNK e DINGER, 1994b). Esses modelos consideram que as partículas estão em contato quando a quantidade de líquido adicionada é inferior à porosidade do sistema empacotado, levando em conta a distribuição granulométrica e a superfície específica das partículas (Equação 5).

$$IPS = \frac{2}{VSA} x \left[\frac{1}{V_s} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right] \quad (\text{Equação 5})$$

Onde,

IPS = distância de separação interparticular (μm)

VSA = área superficial volumétrica (m^2/cm^3)

V_s = porcentagem volumétrica de sólidos na mistura

P_{of} = porcentagem total de poros do sistema, considerando a porosidade das partículas e do seu empacotamento

Sendo assim, a utilização de uma distribuição granulométrica que resulte em um maior empacotamento leva à demanda de uma menor quantidade de água para promover uma separação das partículas, uma vez que o espaço vazio do sistema será menor. Isso é válido para suspensões de partículas finas, como argamassas, nas quais a água é o fluido que as separa. No caso de concretos, o fluido que separa os agregados graúdos (brita) é a matriz (argamassa) e não apenas a água (PILEGGI, 2001).

2.5.1 Caracterização reológica de argamassas

Caracterizar o desempenho reológico e a trabalhabilidade de uma argamassa é uma tarefa desafiadora, uma vez que este é um conceito de certa forma relativo. A trabalhabilidade depende das propriedades do material (argamassa ou concreto), da forma de aplicação e do método de avaliação (FERRARIS, 1999).

A Associação Japonesa dos Engenheiros Civis define a trabalhabilidade como a propriedade da argamassa, no estado fresco, que determina a facilidade com que é possível que ela seja misturada, aplicada e compactada sem que ocorra uma segregação dos materiais nela presentes (FERRARIS, 1999).

Existem inúmeros procedimentos desenvolvidos para esta tarefa, contudo, nenhum deles permitem medir todos os aspectos que definem a trabalhabilidade (KOEHLER e FOWLER, 2003). Outra dificuldade na caracterização de argamassas são as medidas do tipo mono-ponto, como o ensaio de mesa de consistência.

Este ensaio é regulamentado de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2005b), no qual a argamassa é moldada em um cone metálico padrão e, após a retirada do cone, submetida a 30 impactos consecutivos durante 30 segundos. Ao final é medido o diâmetro final da argamassa espalhada (Figura 2.23).

$D_{inicial}$ = diâmetro inferior do molde cônico; D_{final} = diâmetro médio da argamassa após o espalhamento

Figura 2.23 – Representação esquemática da mesa de consistência (PILEGGI, 2001)

Apesar de amplamente conhecido e utilizado a muito tempo, este é um ensaio do tipo mono-ponto, no qual um único valor representa o comportamento da argamassa. Esses tipos de ensaios são insuficientes para caracterizar a natureza reológica de materiais tão complexos como argamassas, as quais possuem uma natureza multifásica e reativa.

Desse modo, a avaliação das argamassas por ensaios mono-ponto é limitada e pode levar a conclusões equivocadas em relação a alguns parâmetros de formulação e aplicação dos materiais (BANFILL, 1991; CARDOSO, 2009). Para se realizar uma caracterização adequada do comportamento complexo de argamassas é necessária a utilização de equipamentos capazes de medir seu comportamento ao longo do tempo, sob condições padronizadas, como as técnicas de reometria (BANFILL, 1991; CARDOSO, 2009).

2.5.1.1 Reometria rotacional

Os reômetros rotacionais são equipamentos dedicados à avaliação de propriedades reológicas de fluidos e suspensões (incluindo argamassas e concretos) em diversas taxas de fluxo através da aplicação de cisalhamento gerado por movimentos cíclicos rotacionais. Determinam parâmetros como viscosidade e tensão de escoamento através da aplicação de cisalhamento e avaliação do torque necessário para tal (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000).

O reômetro rotacional desenvolvido no Departamento de Engenharia de Construção Civil da POLI-USP para caracterização de argamassas e concretos (Figura 2.24) para medidas desde fluidos até concretos, em movimento circular planetário. A medida do torque é realizada no próprio elemento cisalhante, enquanto o recipiente que contém o material (capacidade 5 L) permanece estático. Todas as operações de controle, coleta e armazenamento de dados são realizadas através de software de controle.

Figura 2.24 - Reômetro POLI-USP para argamassas e concretos

Além disso, diferentemente dos demais reômetros disponíveis, o equipamento da POLI-USP ainda permite a realização do preparo de argamassas, assim eliminando a necessidade de prévia mistura e, principalmente, sendo capaz de medir o comportamento de mistura destes materiais (CARDOSO, 2009), como exemplificado na Figura 2.25.

Figura 2.25 - Curvas de mistura das argamassas comerciais de revestimento avaliadas no reômetro POLI-USP sob rotação constante. A energia de mistura é determinada como a área embaixo da curva

A Figura 2.26 apresenta curvas reológicas, obtidas no equipamento citado, típicas de formulações de argamassas desenvolvidas com finalidades distintas. Essa argamassa de revestimento para aplicação manual caracteriza-se por possuir tensão de escoamento (ainda que baixa) e elevada viscosidade.

Contrariamente, o material para aplicação mecânica por spray apresenta alta tensão de escoamento e também alta viscosidade (provavelmente para evitar segregação durante bombeamento), porém, com um forte caráter pseudoplástico (o que facilita a aplicação por spray em altas taxas de fluxo). Por sua vez, a argamassa auto-nivelante (auto-escoante) apresentou baixa viscosidade e tensão de escoamento praticamente nula, características típicas deste tipo de material.

Figura 2.26 - Curvas reológicas (torque x rotação), obtidas no reômetro POLI-USP com configuração em planetário, de formulações de argamassas para aplicações distintas

2.5.1.2 Squeeze-flow

O squeeze-flow é um método de caracterização reológica consagrado na indústria alimentícia, cosmética e de compósitos poliméricos (CARDOSO, CAMPORA *et al.*, 2010), o qual consiste na medida do esforço necessário para a compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica do material entre duas placas paralelas.

A Figura 2.27 ilustra a geometria utilizada nos ensaios de squeeze-flow em argamassas de revestimento, conforme ABNT NBR 15839:2010 (ABNT, 2010). Durante o ensaio, o material flui radialmente à medida que as placas se aproximam e a resistência gerada pelo material a cada instante é a carga registrada pela prensa.

Figura 2.27 – Geometria utilizada nos ensaios de squeeze-flow em argamassas de revestimento, conforme ABNT NBR 15839:2010. (a) Início do teste; (b) Final do teste (CARDOSO, 2009)

A Figura 2.28 demonstra a comparação do comportamento reológico de diferentes argamassas de revestimento do mercado brasileiro avaliado por squeeze-

flow, associando também os resultados obtidos com a percepção dos pedreiros em relação à aplicabilidade dos produtos (ENGMANN, SERVAIS *et al.*, 2005; CARDOSO, 2009). As amostras foram ensaiadas com velocidade de deslocamento de 0,1mm/s e dimensões de 101 mm diâmetro e 10 mm de altura.

Figura 2.28 - Avaliação reológica por squeeze-flow de diferentes argamassas de revestimento do mercado nacional (ENGMANN, SERVAIS *et al.*, 2005; CARDOSO, 2009)

As argamassas 1 e 6, de difícil fluxo em squeeze-flow (devido ao enrijecimento por deformação), foram classificadas como de difícil aplicação, principalmente em relação às etapas de espalhamento e aperto contra o substrato. Como consequência, a produtividade é prejudicada. Por outro lado, as argamassas 3 e 5, com comportamento plástico até elevadas deformações, foram classificadas como de boa aplicação em virtude da facilidade de espalhamento (ENGMANN, SERVAIS *et al.*, 2005; CARDOSO, 2009). O maior teor de pasta dessas argamassas é a principal razão para o melhor desempenho reológico em relação às argamassas 1 e 6.

2.6 INCORPORAÇÃO DE ADITIVOS EM ARGAMASSAS E CONCRETOS

2.6.1 Aditivos incorporadores de ar

Desde sua descoberta, em 1930, os aditivos incorporadores de ar vêm sendo amplamente utilizados em concretos e argamassas na construção civil (DU e FOLLIARD, 2005). Os incorporadores de ar são espécies químicas que possuem uma

extremidade hidrofílica e a outra hidrofóbica (SALAGER, 1992; DU e FOLLIARD, 2005; ROMANO, 2013), como ilustra a Figura 2.29.

Sendo assim, essas moléculas possuem uma forte tendência de migrar para as interfaces presentes no sistema, de modo que sua extremidade polar fique em contato com a fase líquida e sua outra extremidade, apolar, esteja em contato com o ar, solvente orgânico ou até mesmo uma partícula (SALAGER, 1992; DU e FOLLIARD, 2005; ROMANO, 2013).

Figura 2.29 – Ilustração de uma molécula de incorporador de ar e suas interações com diferentes interfaces (ROMANO, 2013)

Esses aditivos, quando adicionados em concretos e argamassas, modificam a tensão superficial do meio líquido, aumentando assim a capacidade de molhamento do pó. Isso cria pontes entre as partículas de cimento e as bolhas de ar geradas pelo cisalhamento imposto durante a mistura e manuseio, ou seja, segura as bolhas de ar na pasta cimentícia (SALAGER, 1992; ROMANO, 2013), conforme ilustrado na Figura 2.30. Essas alterações fazem com que as bolhas contribuam para o afastamento dos grãos, diminuindo assim o atrito interno.

Figura 2.30 – Efeito da utilização de incorporadores de ar na argamassa (ROMANO, 2013)

A incorporação de ar em concretos e argamassas possibilita uma economia elevada, uma vez que o material cimentício mais leve permite uma redução na quantidade de armaduras necessárias para sustentar o peso do concreto das construções e reduz a quantidade de material necessária para preencher o mesmo volume.

Além disso, apresenta inúmeras outras vantagens, como reduzir a tendência à exsudação e o módulo de elasticidade, melhorar a trabalhabilidade e a coesão dos sistemas, facilitando assim seu espalhamento manual (DU e FOLLIARD, 2005). No estado endurecido, contudo, a incorporação de ar também causa uma redução da resistência mecânica, devido ao aumento da porosidade do sistema.

2.6.2 Aditivos retentores de água

Os aditivos celulósicos são amplamente utilizados na fabricação de concretos e argamassas pela sua capacidade de aumentar a viscosidade da fase aquosa, o que, entre outros fatores, eleva a capacidade de retenção de água do sistema (BETIOLI, 2007; BRUMAUD, BESSAIES-BEY *et al.*, 2013).

Os aditivos celulósicos são polímeros derivados da celulose, ilustrada na Figura 2.31, por meio da sua conversão em éteres e ésteres celulósicos através da substituição dos grupos “OH” por diferentes grupos funcionais (CLASEN e KULICKE, 2001; BETIOLI, 2007).

Figura 2.31 – Estrutura molecular da celulose e alguns substituintes (CLASEN e KULICKE, 2001; BETIOLI, 2007)

Em função do tipo de substituição, diferentes propriedades são obtidas na solução aquosa, como capacidade de retenção de água, pseudoplasticidade e formação de filme. Na produção de argamassas os polímeros celulósicos mais utilizados são os não iônicos, como o hidroxetil, metil hidroxetil e o metil hidroxetil

celulose (MHEC) (CLASEN e KULICKE, 2001). Os mecanismos de interação dos aditivos celulósicos com a água podem ser classificados em três etapas principais:

- a) Adsorção: as moléculas poliméricas de cadeia longa aderem na periferia das moléculas de água, adsorvendo e fixando parte da água do sistema; isto faz com que a viscosidade da água aumente;
- b) Associação: podem ocorrer forças de atração entre as moléculas adjacentes o que dificulta ainda mais a movimentação da água e, conseqüentemente, aumenta ainda mais sua viscosidade, causando assim a formação de um gel (denominado hidrogel);
- c) Entrelaçamento: em altas concentrações e sob baixas taxas de cisalhamento, as cadeias poliméricas podem se entrelaçar, o que também aumenta a viscosidade da água.

O hidrogel possui uma estrutura em forma de rede tridimensional, com ligações cruzadas, podendo assim aprisionar uma grande quantidade de água. Por isso os aditivos celulósicos são também conhecidos como aditivos retentores de água (BETIOLI, 2007). Desse modo evita-se que a água seja perdida da matriz cimentícia, seja por evaporação ou por absorção externa (parede absorvendo a água da argamassa de revestimento, por exemplo), garantindo assim a trabalhabilidade da argamassa ou do concreto por mais tempo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de agregados miúdos reciclados utilizadas são oriundas da usina de reciclagem Urbem Tecnologia Ambiental, localizada na região do ABC de São Paulo. A amostragem primária (realizada na usina) bem como a produção de areia reciclada a partir de RCD são descritas no trabalho de Ulsen e colaboradores (ULSEN, 2011; ULSEN, KAHN *et al.*, 2013) e é ilustrada, de uma maneira resumida, na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma do processamento das amostras de areias recicladas utilizadas

As amostras de areia reciclada (VSI-PB, VSI-NÃOmag e VSI-mag) foram escolhidas por possuírem, além da composição mineral, densidades e superfície específica, porosidades bem distintas, possibilitando assim a avaliação dos efeitos de uma ampla faixa de porosidade em argamassas. Já a faixa granulométrica (-1,2+0,15 mm) foi escolhida uma vez que esta foi a que apresentou a maior liberação entre os agregados e a pasta de cimento endurecida (ULSEN, 2011; ULSEN, KAHN *et al.*, 2013), tendo assim um maior potencial de aplicação.

Também foram utilizadas três areias naturais, comercializadas na cidade de São Paulo, identificadas abaixo:

- IPT: areia padrão da norma brasileira NBR-7214 (ABNT, 2012) composta fundamentalmente de quartzo, produzida e comercializada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo;
- Cajamar: areia produzida a partir da britagem de rochas calcárias, comercializada na cidade de São Paulo;
- Fluvial: areia de origem fluvial composta fundamentalmente de quartzo e comercializada na cidade de São Paulo.

As areias foram amostradas nas dependências do laboratório, em pilha de homogeneização alongada e amostrador Jones (PETERSEN, MINKKINEN *et al.*, 2005; SAMPAIO, FRANÇA *et al.*, 2007). Estes mesmos métodos foram utilizados nas etapas de amostragem posteriores. As amostras utilizadas em cada etapa do estudo são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Sumário das amostras utilizadas e dos objetivos de cada etapa dos estudos

Etapas	Objetivos	Cap.	Amostras utilizadas
Determinação da porosidade de agregados miúdos reciclados por porosimetria com intrusão de mercúrio	Estabelecer procedimentos para determinação da porosidade de agregados miúdos reciclados por meio de porosimetria por intrusão de mercúrio.	5	VSI 65-75
Desempenho reológico de argamassas com areias de diferentes morfologias	Avaliar o comportamento reológico de argamassas formuladas com agregados miúdos de diferentes morfologias	6	Fluvial IPT Cajamar
Desempenho reológico de argamassas com areias de diferentes porosidades	Avaliar o comportamento reológico de argamassas formuladas com agregados miúdos reciclados com diferentes porosidades	7	IPT Cajamar VSI-PB VSI-Mag VSI-NaoMag

Como explicado anteriormente, diferenças na distribuição de tamanho das partículas acarretam em grandes diferenças no empacotamento e, conseqüentemente, no desempenho reológico das argamassas. Portanto, é essencial que o efeito da distribuição granulométrica seja minimizado, uma vez que sua influência não é foco do presente trabalho.

Para isso, nas etapas em que foi avaliado o desempenho reológico as areias utilizadas foram peneiradas à úmido, em oito telas compreendidas no intervalo entre 1,2 e 0,15 mm, sendo elas: 1,20 mm, 0,84 mm, 0,60 mm, 0,42 mm, 0,30 mm, 0,21 mm e 0,15 mm. As frações foram então homogeneizadas, amostradas e compostas, de modo que tivessem a mesma distribuição granulométrica (% em massa) da areia reciclada VSI-PB (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Distribuição granulométrica das amostras determinada por peneiramento a úmido

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS MIÚDOS

As amostras foram caracterizadas segundo os parâmetros e procedimentos abaixo descritos. As atividades foram conduzidas no Laboratório de Caracterização Tecnológica e no Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

Análise granulométrica: realizada por peneiramento a úmido (CHAVES e PERES, 2006) em seis peneiras da série Tyler com aberturas entre 2,0 a 0,074 mm. Adicionalmente, foram também realizadas determinações por análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas em equipamento Camsizer-L, da marca Retsch, bem

como pela técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo com o equipamento Mastersizer S long bed da marca Malvern.

Morfologia de partículas: por análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas em equipamento Camsizer-L, segundo procedimento descrito pela norma ISO 13322-2/ 2006 (ISO, 2006).

Densidade: por meio de picnometria por intrusão de gás hélio em equipamento AccuPyc II 1340, da marca Micromeritics, em amostras previamente pulverizadas e secas.

Porosidade: por porosimetria com intrusão de mercúrio em equipamento AUTOPORE IV, da marca Micromeritics, de acordo com o procedimento descrito pela norma ISO 15901-1/ 2005.

Superfície específica: foi determinada através da adsorção gás nitrogênio utilizando a técnica de BET (Micromeritics ASAP 2010).

Análise química: análise química quantitativa por fração granulométrica por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) a partir de amostras fundidas, em equipamento Axios Pro, marca PanAlytical, e determinação da perda ao fogo (ou perda por calcinação) a 1.050° C.

3.3 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS

As argamassas foram preparadas e caracterizadas segundo os parâmetros e procedimentos abaixo descritos. As atividades foram conduzidas no Laboratório de Microestrutura (LME) do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.

Reometria Rotacional

O procedimento de mistura utilizado consistiu em ciclos de 2 minutos de mistura sob rotação constante de 126 RPM. A adição de água foi feita após os 10 segundos iniciais do ciclo, com uma taxa de 120 g/s. Nos casos em que foi necessária a adição de mais água o procedimento foi repetido, algumas vezes com duas adições de água no ciclo de mistura (após 10 e 70 segundos).

Para análise do comportamento ao ciclo de cisalhamento, depois da realização da mistura, foram aplicados dois ciclos completos com patamares de 6,3; 12,7; 25,3;

38,0; 63,3; 126,5; 189,8; 253,0 e 316,3 RPM, com permanência de 5 segundos em cada rotação (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Programa de rotações do teste de ciclo de cisalhamento

Squeeze-flow

Na presente pesquisa os ensaios foram realizados imediatamente após os ciclos de cisalhamento no reômetro rotacional utilizando os seguintes parâmetros experimentais:

- deslocamento máximo 9 mm
- velocidade de deslocamento 0,1 e 3 mm/s

Mesa de consistência

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2005b), no qual a argamassa é moldada em um cone metálico padrão e, após a retirada do cone, submetida a 30 impactos consecutivos durante 30 segundos. Ao final é medido o diâmetro final da argamassa espalhada.

Moldagem dos corpos de prova

Depois da avaliação reológica, 15 corpos-de-prova (cp) cilíndricos (50 mm diâmetro por 60 mm de altura) de cada argamassa foram moldados (através de preenchimento em 2 camadas com aplicação de 10 quedas ao final de cada camada) para determinação do módulo de elasticidade, resistência mecânica e porosidade.

A cura dos cp's foi realizada em condição controlada (90%UR e 23°C) por 28 dias. Após este período, permaneceram em câmara seca por 5 dias e depois, para garantir totalmente a secagem, permaneceram mais 2 dias em estufa a 50°C antes da realização dos testes.

Porosidade

Sete metades de cada composição dos corpos-de-prova utilizados para avaliação de resistência mecânica foram saturadas com água sob vácuo e as densidades e porosidades aparentes e totais foram determinadas pelo princípio de Arquimedes.

Módulo de elasticidade

Após os procedimentos de cura e secagem acima descritos, as amostras foram ensaiadas através do método de ultrassom (equipamento Pundit, Figura 3.4) para determinação do módulo de elasticidade, conforme descrito por (MONTE, ALMEIDA *et al.*, 2007).

Figura 3.4 - Equipamento de ultrassom para medida do módulo de elasticidade

Resistência mecânica

A resistência mecânica à tração foi determinada por compressão diametral (Figura 3.5) e medida nas mesmas amostras utilizadas para os ensaios de módulo de elasticidade. O teste é baseado na norma (ASTM, 2004) (mas em amostras de menores dimensões) e foi executado utilizando uma INSTRON (modelo 5569) com célula de carga de 50 kN e controle por carga (taxa de carregamento utilizada 0,833 MPa/min).

Figura 3.5 – Teste de resistência à tração por compressão diametral

4 DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS POR POROSIMETRIA COM INTRUSÃO DE MERCÚRIO

4.1 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

A determinação da porosidade, alternativamente às técnicas convencionais de caracterização de agregados, pode ser realizada por porosimetria com intrusão de mercúrio (Figura 4.1). Embora pouco aplicada a agregados reciclados, é a técnica mais importante para a determinação de porosidade de materiais (WEBB e ORR, 1997). Em uma única medida de duração geralmente por volta de 60 minutos é possível determinar a porosidade da amostra, a distribuição do tamanho de poros, do volume total de poros e da área específica do material.

Figura 4.1 - Porosimetria com intrusão de mercúrio

O cálculo da porosidade do material por intrusão de mercúrio é feito através da equação:

$$Porosidade (\%) = \frac{V_{haste\ consumido}}{V_B} * 100$$

Vhaste consumido = volume de Hg contido na haste que penetrou no bulbo preenchido com amostra; corresponde ao volume de poros da amostra (ml)

VB = volume bulk - volume da amostra na pressão de enchimento utilizada (ml)

Apesar de ser um cálculo simples, quando se trata de materiais finos ou em pó, a determinação do volume aparente da amostra não é trivial. O equipamento calcula o volume aparente da amostra (V_B) da seguinte maneira:

$$V_B = V_{\text{penetrometro}} - V_{Hg}$$

onde,

$$V_{Hg} = \frac{M_{\text{conjunto}} - M_{\text{amostra}} - M_{\text{penetrometro}}}{\rho_{Hg}}$$

$V_{\text{penetrometro}}$ = volume do penetrômetro (bulbo + haste) (ml)

V_{Hg} = volume de mercúrio introduzido (ml)

M_{conjunto} = massa do conjunto penetrômetro + amostra + mercúrio (g)

M_{amostra} = massa da amostra (g)

$M_{\text{penetrometro}}$ = massa do penetrômetro (g)

A massa da amostra é informada pelo usuário, sendo pesada antes de iniciar o ensaio. A massa do conjunto é obtida após o estágio de baixa pressão, no qual ocorre o preenchimento do penetrômetro com mercúrio. O penetrômetro preenchido com amostra e mercúrio é então pesado e a massa do conjunto inserida nos dados do programa; inicia-se então o estágio de alta pressão.

A dificuldade, no caso de materiais finos ou em pó, é na determinação da pressão de enchimento correta; essa pressão deve ser tal que o mercúrio preencha todo espaço entre as partículas, mas sem penetrar nos seus poros (VAN BRAKEL, MODRÝ *et al.*, 1981), tal como ilustrado na Figura 4.2, sendo em cinza o mercúrio, em branco os vazios não preenchidos pelo mercúrio e as partículas de diferentes granulações em azul. A pressão de enchimento pode ser definida pelo usuário entre 0,2 a 20 psi; já no estágio de alta pressão pode alcançar até 60.000 psi.

Figura 4.2 – Ilustração da penetração do mercúrio nas diferentes pressões de enchimento no penetrômetro

Após o término do ensaio é possível traçar o gráfico “volume de mercúrio introduzido x pressão”, possibilitando assim uma comparação do volume introduzido nos pontos de baixa e alta pressão.

O cálculo do diâmetro de poro correspondente à pressão empregada é feito de acordo com a equação de Washburn, através da qual é possível plotar um gráfico que correlaciona a pressão com o tamanho de poro preenchido (Figura 4.3). Esta abordagem aproxima o formato dos poros à cilindros (SMITH e STERMER, 1986; LOWELL e SHIELDS, 1991; LEÓN Y LEÓN, 1998). A pressão de 20 psi (pressão máxima de enchimento) é capaz de penetrar em poros de cerca de 9 μm (para um ângulo de contato de 130° entre o Hg e a amostra).

Figura 4.3 – Relação entre a pressão de enchimento e diâmetro médio de poros (ângulo de contato de 130°)

O ângulo de contato é um parâmetro que varia para cada tipo de material. Ele não influencia a medida da porosidade total da amostra, uma vez que o cálculo da porosidade é feito apenas com o volume de Hg consumido e o volume aparente da amostra (como mostrado anteriormente), contudo, o ângulo de contato influencia diretamente na distribuição de tamanho de poros da amostra (LOWELL, SHIELDS *et al.*, 2006).

O ângulo de contato, para a grande maioria dos materiais, varia entre 130° e 140° e, para fins comparativos, é recomendável utilizar um mesmo valor de ângulo de contato (LOWELL e SHIELDS, 1991; LOWELL, SHIELDS *et al.*, 2006). A Tabela 4.1 apresenta o ângulo de contato para alguns materiais disponíveis na literatura.

Tabela 4.1 – Ângulo de contato de alguns materiais com mercúrio (SMITHWICH III, 1988; LEÓN Y LEÓN, 1998; LOWELL, SHIELDS *et al.*, 2006)

Material	Ângulo de contato ϕ (°)
Argamassa	130
Vidro	130
Aço	130
Quartzo	130-147
Cimento Portland	140,7
Carvão	142
Mica	126
Calcita	146

A medição do ângulo de contato do Hg com o material exige não só equipamentos, como uma preparação específica. De acordo com o manual do equipamento AUTOPORE IV 9500, o emprego do ângulo de contato de 130° é uma boa aproximação para a maioria dos materiais. Porém, uma variação de apenas 1° no ângulo de contato gera erros no tamanho de poros de cerca de 2% (LOWELL, SHIELDS *et al.*, 2006).

4.1.1 Superfície específica

A superfície específica medida pelo porosímetro de mercúrio é calculada como sendo a área lateral dos poros, que por sua vez são aproximados à cilindros (Figura 4.4). Sendo assim, sofre uma influência direta de duas dificuldades da técnica: medir o ângulo de contato para cada material e determinar a pressão de enchimento correta (manual AUTOPORE IV 9500).

De acordo com os cálculos empregados, o ângulo de contato muda o diâmetro de poro equivalente à pressão empregada, sendo assim, irá influenciar diretamente na superfície específica medida pelo equipamento. Como dito anteriormente, o ângulo de contato entre o Hg e o material é de difícil medição. Além de necessitar de equipamentos e preparação específicos, no caso de amostras como RCD, que são compostas por diversos minerais, a determinação do ângulo de contato é complicada.

Com relação a pressão de enchimento, assim como a porosidade, a superfície específica pode ser superestimada, caso a P.E. utilizada deixe muitos vazios entre as partículas, ou subestimada, caso a P.E. empregada faça com que o Hg penetre nos maiores poros da amostra.

Desse modo,

$$V_c = \pi r^2 h$$

$$Al = 2\pi r h = \frac{4}{2} * \frac{\pi r^2 h}{r} = 4 * \frac{V_c}{D}$$

$$Sup. espec. = \sum_i^n 4 * \frac{V_{ci}}{D_i}$$

Onde,
 V_c = volume do cilindro = volume de Hg introduzido em cada ponto i de pressão (ml/g)
 Al = área lateral do cilindro
 D = diâmetro de poro (μm)
 i = ponto de pressão inicial
 n = ponto de pressão final

Figura 4.4 – Modelo de cálculo da superfície específica pelo equipamento AUTOPORE IV 9500

Além da técnica de porosimetria por intrusão de Hg, existem outros métodos para determinação da superfície específica. A mais utilizada é a adsorção física de gases inertes, por meio do modelo BET referente ao cálculo das isotermas estudadas por Brunauer-Emmett-Teller (LOWELL, SHIELDS *et al.*, 2006).

Os métodos convencionais de medida da superfície especificam por meio do modelo BET utilizam a adsorção de nitrogênio líquido para o cálculo das isotermas, as quais podem ser classificadas em três regiões distintas (BRITO, 2009): a) a primeira, que ocorre com valores baixos de pressão relativa, corresponde a adsorção das moléculas de N_2 nas regiões favoravelmente energéticas da partícula. Nesta região é onde reside a informação sobre a área superficial da partícula e onde é feito o tratamento de BET para sua determinação; b) a segunda região, a qual ocorre para valores intermediários de pressão, é referente a sobreposição de camadas de gás sobre a superfície da partícula; c) a terceira região, que ocorre para valores altos de pressão, é característica do fenômeno de condensação do volume gasoso.

As principais vantagens do BET, em relação à medida pelo porosímetro de Hg, é o fato desta não sofrer influência do ângulo de contato e do empacotamento das partículas (LOWELL, SHIELDS *et al.*, 2006) o que, como explicado anteriormente, pode acarretar em desvios significativos. Contudo, apresenta uma limitação com relação ao tamanho das partículas. Devido as dimensões do porta amostras, a análise de partículas maiores do que 0,60 mm já se torna complicada.

4.2 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS

Inicialmente foram testadas diferentes condições operacionais do equipamento e dos ensaios, para melhor entendimento do funcionamento do porosímetro e dos cálculos dos parâmetros. Foram consideradas diferentes pressões de enchimento, variações no tempo de preenchimento com o mercúrio, diferentes tipos de amostras e granulações.

A pressão de enchimento pressupõe a pressão na qual o mercúrio é capaz de penetrar no bulbo que contém a amostra e preencher os espaços vazios sem penetrar nos poros da amostra (VAN BRAKEL, MODRÝ *et al.*, 1981).

A análise de porosimetria propriamente dita se inicia nas pressões acima da pressão de enchimento, inicialmente nas medidas em baixa pressão (até 50 psi) e posteriormente em alta pressão (até 60.000 psi) (SMITH e STERMER, 1986).

Uma amostra de areia reciclada (VSI 65-75), previamente caracterizada por outros métodos e granulometria na faixa de $-1,2+0,15$ mm foi analisada no porosímetro com pressão de enchimento de 0,5 psi. O gráfico do volume de mercúrio introduzido em função da pressão, juntamente com os dados obtidos no ensaio são apresentados na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Ensaio com pressão de enchimento de 0,53 psi, amostra VSI 65-75

Dos dados do gráfico verifica-se um enorme pico de intrusão de mercúrio em um intervalo de baixa pressão, entre 0,5 e 10 psi (Figura 4.5-A). Adicionalmente, nota-se que o volume de intrusão cai gradativamente com o aumento de pressão até praticamente zerar por volta de 20 a 30 psi (Figura 4.5-B), voltando a aumentar

posteriormente. Esse aumento, porém, é cerca de 10 vezes menor do que o notado nas baixas pressões.

Considerando o gráfico, a porosidade final obtida (47,2%) e o conhecimento das características da amostra através de outros métodos de caracterização, conclui-se que a pressão de enchimento não foi suficiente para preencher todo espaço entre as partículas. Esse espaço foi preenchido gradativamente com o aumento de pressão e, erroneamente, foi considerado como sendo parte do volume de poros do material. O preenchimento dos poros da amostra acessíveis ao mercúrio começa a ocorrer por volta de 30 psi, até este ponto vemos apenas o preenchimento do espaço vazio entre as partículas.

Dessa forma conclui-se que 0,5 psi de pressão de enchimento (pressão usualmente utilizada na análise de materiais sólidos) não foram suficientes para que o mercúrio preenchesse os espaços vazios entre as partículas.

4.2.1 Testes de enchimento

A mesma amostra VSI 65-75 foi peneirada em uma faixa mais estreita, em $-0,6+0,30$ mm, e então analisada com diferentes pressões de enchimento e tempo de estabilização. Os ensaios foram feitos apenas no estágio de baixa pressão (máximo de 50 psi), uma vez que o pico de intrusão situava-se nesta faixa. Os resultados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Testes de enchimento com diferentes pressões e tempo de equilíbrio

Pressão de enchimento (psi)	tempo (s)	massa (g)	volume total de Hg introduzido até 50 psi (ml)
5	10	5,38	0,0460
5	60	5,40	0,0463
10	10	5,49	0,0153
10	60	5,91	0,0163
20	10	5,57	0,0053
20	60	5,61	0,0067

Observa-se que o tempo de equilíbrio não teve influência no volume introduzido. Por outro lado, a pressão de enchimento altera significativamente os resultados, tal como anteriormente demonstrado. Como foi observado na Figura 4.5, o preenchimento dos poros, para a amostra estudada, passa a ocorrer por volta de 20

a 30 psi. Sendo assim a pressão de enchimento que será utilizada nas medições é a de 20 psi (pressão de enchimento máxima possível), uma vez que proporcionou o melhor preenchimento do espaço vazio entre as partículas.

A amostra VSI 65-75 com granulometria na faixa -1,2+0,15 mm foi submetida novamente ao ensaio no porosímetro com pressão de enchimento de 20 psi. Os resultados, apresentados na Figura 4.6, mostram que em nenhum momento do ensaio ocorre um pico de intrusão tão acentuado como no ensaio anterior. A diferença do volume introduzido no segundo ensaio é devido à maior quantidade de massa utilizada, porém, nota-se uma tendência de comportamento similar nas duas curvas nos pontos de alta pressão, acima de 30 psi.

Figura 4.6 – Comparação dos resultados com diferentes pressões de enchimento

Pode-se destacar ainda:

- A enorme diferença no volume total de mercúrio introduzido. Apesar de se ter utilizado 4 vezes mais massa no segundo ensaio, este consumiu cerca de 2,5 vezes menos volume de mercúrio.
- As densidades, aparente e esqueleto, estão muito mais realistas no segundo ensaio, uma vez que a amostra é constituída majoritariamente de grãos de quartzo, feldspato e pasta de cimento.
- A porosidade do material determinada no segundo ensaio é quase cinco vezes menor do que no primeiro ensaio, sendo mais condizente com os valores de porosidade de agregados reciclados.

- Tendo em vista que não houve diferenças na medida de porosidade para os diferentes tempos de equilíbrio, utilizou-se 10 s para ambas as medidas.

Apesar da melhora nos resultados, não há como verificar se a pressão de enchimento em 20 psi é suficiente para preencher todo o espaço de vazios entre as partículas nem para garantir que nesta pressão não ocorra penetração do mercúrio nos poros da amostra. Essa sensibilidade se dá pelo conhecimento do operador na amostra analisada e pela realização dos testes de enchimento em diferentes pressões.

Outro fator que se verificou ter extrema relevância na precisão dos resultados é o volume de mercúrio da haste que é consumido na análise. A medida da quantidade de mercúrio introduzido é feita através da diferença de potencial elétrico criada pelo material condutor que recobre a haste e o mercúrio nela presente. Desse modo, para garantir uma boa precisão da medida feita pelo equipamento, ao final do ensaio, o volume de mercúrio introduzido deve ficar entre **20 e 90%** do volume total da haste.

Tendo-se percebido isto, a escolha do volume bulbo e da haste do penetrômetro deve ser feita considerando-se o volume de mercúrio da haste a ser consumido, para tal é necessário assumir uma porosidade inicial do material. O procedimento de cálculo para facilitar a escolha do penetrômetro de acordo com o material é apresentado na Figura 4.7.

SELEÇÃO DE PENETRÔMETROS		
Dados da amostra		
Massa amostra seca (g):	15,00	
Densidade da amostra (g/cm ³):	3,50	<i>densidade real da amostra, sem poros</i>
Porosidade estimada da amostra (%):	3%	
Volume intersticial estimado (%):	40%	<i>em geral 40-60%, amostra sólida = 0</i>
Valores calculados		
Volume da amostra (cm ³):	4,29	
Volume de poros (cm ³):	0,13	<i>dado utilizado para seleção da haste</i>
Volume de vazios intersticial (cm ³):	2,94	
Volume aparente da amostra (cm ³):	4,41	
Volume amostra + vazios (cm ³):	7,36	<i>dado utilizado para seleção do bulbo</i>
Escolha do bulbo do penetrômetro		
Volume MAX bulbo utilizado (%):	70%	<i>preenchimento do bulbo</i>
Volume MIN bulbo utilizado (%):	40%	
Volume MIN do bulbo (cm ³):	10,5	<i>selecionar penetrômetro com bulbo de volume entre estes valores</i>
Volume MAX do bulbo (cm ³):	18,4	
Escolha da haste do penetrômetro		
Volume MAX haste (%):	90%	<i>preenchimento da haste</i>
Volume MIN haste (%):	25%	
Volume MIN do bulbo (cm ³):	0,143	<i>selecionar penetrômetro com volume máximo medido entre estes valores</i>
Volume MAX do bulbo (cm ³):	0,514	

Dados da amostra
Valores pré-estabelecidos

Figura 4.7 – Seleção do penetrômetro a ser utilizado com base nas características do material

A Tabela 4.3 apresenta os resultados de ensaios conduzidos na amostra VSI 65-75 em diferentes faixas granulométricas. Nela observa-se um aumento gradativo da porosidade com a diminuição da granulometria, comportamento este inverso ao observado por outras técnicas de caracterização.

Tabela 4.3 - Ensaio com pressão de enchimento de 20 psi para diferentes frações granulométricas

Dados do ensaio	Fração (mm)		
	-2,0+1,2	-1,2+0,6	-0,6+0,3
M _{amostra} (g)	4,68	3,65	5,03
M _{penetrometro} (g)	83,58	83,58	82,96
M _{conjunto} (g)	255,13	259,78	256,19
V _{haste} (ml)	0,366	0,366	0,366
V _{penetrometro} (ml)	14,3209	14,3209	14,6273
Pressão de enchimento (psi)	19,99	19,99	19,99
Tempo de equilíbrio (s)	10	10	10
V _{Hg} (ml)	0,1909	0,1617	0,2505
ρ_{aparente} (em 0,53 psi)	2,3509	2,3233	2,2875
$\rho_{\text{esqueleto}}$ (g/ml)	2,6001	2,59	2,5819
Porosidade (%)	9,6	10,3	11,4

Tal resultado demonstra que a pressão de enchimento nas frações mais finas não seja suficiente para que o mercúrio penetre entre as partículas, sendo essa diferença atribuída então a porosidade do material.

No entanto, a pressão de enchimento utilizada de 20 psi é a máxima possível, de forma que a correção dos cálculos de porosidade, caso seja necessário desconsiderar os volumes iniciais a baixas pressões, deve ser feita após o término da análise.

A definição da pressão necessária para que o mercúrio penetre nos espaços entre as partículas e não dentro dos poros das partículas é feita com base em conhecimentos prévios da amostra (estimativas iniciais da porosidade), da granulação da amostra e da observação do gráfico de volume de mercúrio introduzido pela pressão aplicada. No entanto, esta estimativa pode levar a erros de muitas ordens de grandeza (um exemplo será mostrado mais adiante).

4.2.2 Procedimento com materiais de referência

Para se determinar com mais exatidão qual a pressão necessária para o preenchimento intergranular de amostras de material particulado, aplicou-se o mesmo procedimento realizado para amostra de agregados miúdos reciclados em esferas de vidro e uma amostra de areia natural com as mesmas granulometrias dos agregados. Considerando-se que as esferas de vidro não apresentam porosidade, todo o mercúrio

utilizado será para o preenchimento dos espaços vazios entre elas. Tais medidas, por faixa de tamanho, podem ser utilizadas como uma estimativa para correção de medidas realizadas em amostras particuladas quaisquer, uma vez que a forma das partículas irá influenciar no empacotamento.

As esferas de vidro foram peneiradas e utilizadas nas seguintes faixas:

- -1,20+0,85 mm
- -0,85+0,60 mm
- -0,60+0,42 mm
- -0,42+0,30 mm
- -0,30+0,21 mm
- -0,21+0,15 mm

A Figura 4.8 apresenta a esfericidade e relação de aspecto média, medidas no equipamento CAMSIZER, para as faixas de tamanho utilizadas. Nota-se que os materiais não são esferas perfeitas (b/l e esfericidade abaixo de 0,9 para maior parte do intervalo granulométrico).

Figura 4.8 – Distribuição de forma por faixa granulométrica das esferas de vidro

Na literatura, o ângulo de contato medido do Hg com o vidro é de 130° (SMITHWICH III, 1988), sendo este o valor utilizado para os ensaios em questão. Considerando-se que as maiores esferas estão na faixa de 85 a 100 µm, a pressão capaz de preencher poros nesta faixa de tamanho é 2 psi. Desse modo foi utilizada como pressão de enchimento nos ensaios.

Os gráficos do volume de mercúrio introduzido em função da pressão para cada fração são apresentados na Figura 4.9 e a média dos resultados dos ensaios na Tabela 4.4. Cada fração foi analisada em duplicata devido à variação que pode ocorrer no empacotamento da amostra.

Figura 4.9 - Volume de mercúrio introduzido por fração granulométrica (análise de esferas de vidro, com pressão de enchimento de 2 psi)

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de porosimetria para as esferas de vidro por fração granulométrica (pressão de enchimento de 2 psi)

Fração (mm)	Vol. Hg (ml/g)	Área superficial (m ² /g)	dens. ap. (g/cm ³)	dens. real (g/cm ³)	Porosidade (%)
-1,20+0,85	0,002	0,001	2,502	2,515	0,5
-0,85+0,60	0,003	0,005	2,503	2,523	0,8
-0,60+0,42	0,008	0,006	2,532	2,583	2,0
-0,42+0,30	0,015	0,004	2,410	2,497	3,5
-0,30+0,21	0,074	0,012	2,085	2,481	16,0
-0,21+0,15	0,269	0,033	1,503	2,520	40,4

O volume de mercúrio introduzido aumenta nas frações mais finas, porém, para as frações menores que 0,30 mm, ocorre um aumento acentuado. Com relação à fração -1,2+0,85 mm, o aumento do volume de mercúrio para a fração -0,30+0,21 mm é de cerca de 30 vezes e para a fração -0,21+0,15 cerca de 120 vezes.

Nota-se que a porosidade aumenta exponencialmente para as frações mais finas, sendo a fração 0,30 mm praticamente o ponto de inversão da curva. Sendo assim, caso uma amostra possua uma porcentagem elevada de material abaixo de 0,30 mm, o ensaio pode resultar em uma porosidade maior do que a real, se realizado com pressão de enchimento de 2 psi.

É importante notar também que a densidade real não apresenta uma grande variação (média de $2,520 \text{ g/cm}^3$ e desvio padrão de 3,5%) independente dos valores de porosidade. Já a densidade aparente é menor para os ensaios que resultaram em uma maior porosidade.

Isso se deve à maneira como é calculada a densidade aparente do material. Como apresentado anteriormente, o volume aparente da amostra é calculado a partir do peso do conjunto “penetrômetro+amostra+Hg” preenchido com a pressão de enchimento determinada pelo operador. Desse modo, nos casos em que a pressão de enchimento não é suficiente para preencher os espaços entre as partículas, esse espaço vazio é considerado como parte do material pelo equipamento, o que resulta em um volume maior e, conseqüentemente, uma densidade aparente reduzida.

Já a densidade real, como é calculada subtraindo-se o volume de Hg introduzido nos pontos de alta pressão, não sofre influência da pressão de enchimento utilizada.

Posteriormente, as esferas foram compostas de modo que ficassem com a mesma distribuição granulométrica da areia VSI-PB (Figura 3.2). A Figura 4.10 apresenta o gráfico de intrusão de mercúrio por ponto de pressão e a Tabela 4.8 a média dos resultados. Além da distribuição granulométrica total (-1,2+0,15 mm), também foram analisadas a composição para o material acima de 0,30 mm (-1,2+0,30 mm) e a fração passante em 0,30 mm (-0,30+0,15 mm), uma vez que esta mostrou ser uma fração crítica para o aumento da intrusão de mercúrio.

Figura 4.10 - Volume de mercúrio introduzido por intervalo granulométrico (análise de esferas de vidro, com pressão de enchimento de 2 psi)

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de porosimetria para as esferas de vidro por intervalo granulométrico (pressão de enchimento de 2 psi)

Fração (mm)	Vol. Hg (ml/g)	Área de superfície específica (m ² /g)	dens. ap. (g/cm ³)	dens. real (g/cm ³)	Porosidade (%)
-1,20+0,15	0,041	0,004	2,305	2,548	9,4
-1,20+0,30	0,012	0,004	2,376	2,447	2,9
-0,30+0,15	0,187	0,020	1,688	2,467	31,6

Na composição -1,2+0,15 mm, a porcentagem de material abaixo de 0,30 mm é de cerca de 30%, o que resultou em um aumento de cerca de 3 vezes em comparação à composição -1,2+0,30 mm. Já a composição -0,30+0,15 mm apresentou um aumento acentuado na intrusão de Hg e, consequentemente, na porosidade e área de superfície específica.

De maneira geral, quanto mais ampla a distribuição granulométrica da amostra, maior será o empacotamento (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000); isso significa que menor será o espaço vazio entre as partículas e, consequentemente, maior será a pressão necessária para que o Hg consiga penetrar completamente nesses vazios.

Uma forma de corrigir esse tipo de problema no estudo de materiais finos (abaixo de 0,30 mm) ou em faixas granulométricas estreitas e com materiais com amplas distribuições de tamanho, seria utilizar uma pressão de enchimento maior, capaz de penetrar aberturas menores.

Através dos dados do ensaio e das fórmulas disponíveis no manual do equipamento (AUTOPORE IV 9500) é possível recalculer os resultados, desconsiderando assim o volume de Hg introduzido até determinado ponto de pressão, como se estivesse utilizando uma pressão de enchimento maior. Desse modo, uma análise realizada com uma pressão de enchimento menor do que a necessária não é perdida.

Para isso, primeiro é preciso calcular o volume de Hg que é introduzido entre as partículas ($VHg_{aparente}$), que consiste na soma do volume introduzido desde a pressão de enchimento (início do ensaio) até uma determinada pressão escolhida (pressão de enchimento). Essa pressão, que corresponde a um determinado diâmetro de poro, é escolhida assumindo-se que o diâmetro de poro correspondente seja o menor espaço intraparticular vazio e que precisa ser preenchido.

$$VHg_{aparente} = \sum_i^n VHg_i$$

$VHg_{aparente}$ = volume de mercúrio introduzido no espaço vazio entre as partículas

VHg_i = volume de mercúrio introduzido em um determinado ponto de pressão (ml)

i = ponto de pressão inicial

n = ponto de pressão assumido como o limite de intrusão no espaço entre as partículas

Desse modo, o volume aparente da amostra (V_{Bc}) é calculado da seguinte maneira:

$$V_{Bc} = V_{penetrometro} - V_{Hg} - VHg_{aparente}$$

V_{Bc} = volume aparente da amostra corrigido (ml)

$V_{penetrometro}$ = volume total do penetrômetro (ml)

V_{Hg} = volume total de mercúrio introduzido no ensaio (ml)

A densidade aparente da amostra é então calculada apenas substituindo-se o volume aparente pelo volume aparente corrigido:

$$\rho_{Bc} = \frac{M_{amostra}}{V_{Bc}}$$

Mamostra = massa da amostra (g)

ρ_{Bc} = densidade aparente corrigida da amostra (g/ml)

O volume real da amostra consiste no volume aparente menos o volume de poros:

$$V_{realc} = V_{Bc} - VHg_{poros}$$

V_{realc} = volume real da amostra corrigido (ml)

Onde,

$$VHg_{poros} = V_{Hg} - VHg_{aparente}$$

VHg_{poros} = volume de mercúrio introduzido nos poros das partículas

A densidade real é então calculada utilizando-se o volume real corrigido:

$$\rho_{realc} = \frac{M_{amostra}}{V_{real}}$$

ρ_{realc} = densidade real corrigida da amostra (g/ml)

Finalmente, a porosidade corrigida ($Porosidade_c$) é calculada com o novo volume de poros e volume aparente da amostra:

$$Porosidade_c (\%) = \frac{VHg_{poros}}{V_{Bc}} * 100$$

A Figura 4.11 apresenta a correlação entre a porosidade e o tamanho de partículas utilizando-se uma pressão de enchimento de 2 psi e uma de 20 psi.

Figura 4.11 – Correlação entre o tamanho das esferas com a porosidade resultante com diferentes pressões de enchimento

Nota-se que, assim como a porosidade resultante da pressão de enchimento de 2 psi, a porosidade residual (acima de 20 psi) também aumenta de maneira exponencial com a diminuição da granulometria das amostras. Isso mostra que mesmo que se utilize a pressão de enchimento máxima (20 psi) ainda restam espaços entre as esferas que só são preenchidos em pressões mais altas, para as frações mais finas chegando na faixa de 1.000 psi conforme o gráfico da Figura 4.10.

Esse fenômeno foi estudado por diversos autores (MAYER e STOWE, 1965; BELL, VAN BRAKEL *et al.*, 1981; SMITH e STERMER, 1986). Segundo seus estudos publicados a região entre duas esferas próximas, aproximada para a forma de um toroide (Figura 4.12), é tão difícil de ser completamente preenchida quanto um poro e, adicionalmente, quanto menor a partícula maior a pressão necessária para preencher essas regiões; sendo esta a causa da porosidade residual das análises de esferas de vidro. Ainda nestes estudos, os autores propuseram diversos modelos matemáticos para calcular o espaço vazio entre as partículas (empacotamento) e a pressão que seria necessária para preenchê-lo completamente.

Figura 4.12 – Ilustração da região entre as esferas de difícil acesso ao mercúrio

Smith e Stermer (1986) publicaram um estudo com esferas de vidro em faixas de tamanho estreitas, no qual calculou que uma pressão de 100 psi seria capaz de preencher a maior parte da região toroidal de esferas de até 120 nm. A Tabela 4.6 apresenta a porosidade residual recalculada para as esferas, assumindo a pressão de enchimento de 100 psi. A porosidade residual nesse caso torna-se bem reduzida, porém, não é nula. Nesse caso, deve-se ressaltar que a faixa de tamanho é relativamente grande e, como foi apresentado da Figura 4.8, os materiais utilizados não são esferas perfeitas.

Tabela 4.6 – Porosidade residual para as esferas de vidro com pressão de enchimento de 100 psi

Fração (mm)	-1,2 +0,85	-0,85 +0,60	-0,60 +0,42	-0,42 +0,30	-0,30 +0,21	-0,21 +0,15	-1,2 +0,15	-1,2 +0,30	-0,30 +0,15
Porosidade (%)	0,08	0,13	0,14	0,17	0,14	0,17	0,20	0,10	0,18

valores recalculados

Do ponto de vista da técnica de porosimetria por intrusão de Hg, esses estudos foram extremamente importantes, pois possibilitaram a compreensão dessas intrusões em elevadas pressões quando se estuda material particulado. Porém, os modelos matemáticos existentes são para esferas, com o mesmo tamanho e modelos de empacotamento ideais. Desse modo, quando se trata de partículas com formatos

irregulares e tamanhos diferentes, esses modelos não podem ser aplicados, ficando impossível prever o empacotamento e, conseqüentemente, o volume de Hg e a pressão que seriam necessários para preencher apenas a porosidade entre as partículas.

Para se avaliar a influência da forma, foram realizadas análises de porosimetria em amostras de areia de brita de origem calcária. A comparação da distribuição de forma por faixa granulométrica da areia com as esferas de vidro é apresentada na Figura 4.13. Nota-se que a areia de britagem possui um formato muito mais alongado.

Figura 4.13 – Forma das partículas (b/l) de areia de brita (areia Caj) e esferas de vidro por intervalo granulométrico

Nessa etapa foram utilizadas apenas a fração mais grossa (-1,2+0,85 mm) e a mais fina (-0,21+0,15 mm) e os intervalos compostos (-1,2+0,30 mm e -1,2+0,15 mm). Os ensaios foram realizados sob as mesmas condições das esferas de vidro, sendo recalculada manualmente a porosidade residual nas pressões de 20 e 100 psi. O ângulo de contato considerado entre a areia de brita calcária e o Hg foi de 140°. As porosidades medidas e recalculadas da areia Caj são apresentadas na Tabela 4.7.

Para a fração -1,2+0,85 mm (Figura 4.14), o pico de intrusão está próximo ao das esferas de vidro (2 a 3 psi). Contudo, a areia Caj apresenta uma maior intrusão entre 10 e 40 psi, indicando espaços menores entre as partículas (maior pressão necessária para preenchimento dos vazios). O volume de Hg introduzido acima de 1.000 psi provavelmente corresponde aos poros da amostra, uma vez que se apresentaram de maneira semelhante nos dois ensaios de cada amostra (análises

duplicadas); por ser uma areia resultante da britagem de rochas, as etapas de quebra podem gerar pequenas fraturas nos grãos.

Já na fração $-0,21+0,15$ mm (Figura 4.15), o pico maior de intrusão ocorre em pressões menores em comparação com as esferas de vidro, mas, assim como na fração $-1,2+0,85$ mm, também se nota uma maior intrusão nas pressões mais altas. Para a areia Caj, ocorre intrusão de Hg praticamente em todas as pressões, desde 2 à 20.000 psi. Neste caso, após o pico de intrusão inicial (2 à 10 psi) é difícil afirmar se a intrusão de Hg é devido ao preenchimento dos vazios entre as partículas ou aos poros da amostra.

As amostras compostas possuem picos de intrusão semelhantes às esferas de vidro (Figura 4.16) e, mais uma vez, nota-se uma intrusão de Hg e praticamente todo intervalo de pressão para a areia Caj.

Figura 4.14 – Comparação do volume diferencial por pressão da fração grossa ($-1,2+0,85$ mm) das esferas de vidro com a areia de brita (areia Caj)

Figura 4.15 - Comparação do volume diferencial por pressão da fração fina (-0,21+0,15 mm) das esferas de vidro com a areia de brita (areia Caj)

Figura 4.16 - Comparação do volume diferencial por pressão das esferas de vidro com a areia de brita (areia Caj) com e sem a presença da fração -0,30 mm

Tabela 4.7 – Resultados da porosimetria por intrusão de Hg com diferentes pressões de enchimento para as amostras de areia de brita (areia Cai)

Fração (mm)	Pressão de enchimento = 2 psi				Porosidade (%)		
	Vol. Hg (ml/g)	Sup.espec. (m ² /g)	dens. ap. (g/cm ³)	dens. real (g/cm ³)*	P.E.=2 psi	P.E.=20 psi *	P.E.=100 psi *
-1,20+0,85	0,010	0,202	2,716	2,790	2,60	1,35	1,26
-0,21+0,15	0,125	0,182	2,144	2,907	26,4	2,99	1,92
-1,20+0,15	0,056	0,038	2,340	2,696	13,1	1,04	0,59
-1,20+0,30	0,017	0,029	2,776	2,916	4,80	0,88	0,40

*valores recalculados; densidade real é calculada a partir da densidade aparente e porosidade

Os valores para a P.E. de 2 psi, assim como nas esferas de vidro, aumentam significativamente para a fração mais fina e para a composição que possui a fração -0,30 mm. As porosidades resultantes da P.E. de 20 e 100 psi (recalculadas) são bem semelhantes para a fração mais grossa; analisando-se o gráfico de intrusão (Figura 4.14), nota-se que a intrusão de Hg praticamente zera por volta de 40 psi, voltando a ocorrer de forma significativa nas pressões acima de 1.000 psi. Isso pode ser considerado como um indicativo de que a intrusão entre as partículas ocorre até pressões de cerca de 40 psi; acima disso, o Hg introduzido corresponde aos poros da amostra.

Já na fração mais fina (-0,21+0,15 mm), a P.E. de 20 psi, apesar de já resultar em uma grande redução na porosidade (de 26,4% para 2,99%), ainda apresenta-se muito elevada, não correspondendo à porosidade de uma areia natural. Mesmo com uma P.E. de 100 psi a porosidade ainda é bem elevada, sendo maior do que a fração mais grossa. Nesse caso, o que parece ocorrer é uma intrusão de Hg no espaço entre as partículas até pressões altas, da ordem de 100 a 1.000 psi (com base nos resultados da fração mais grossa); resultando em uma sobreposição do Hg introduzido entre as partículas e nos poros da amostra.

Para as composições (-1,2+0,15 mm e -1,2+0,30 mm), a P.E. de 20 psi já apresentou resultados mais coerentes. Porém, como dito anteriormente, assim como na fração -0,21+0,15 mm, nas composições ocorre uma intrusão de Hg praticamente em todos os pontos de pressão (Figura 4.16). Dessa forma, é possível que também esteja ocorrendo uma interferência na intrusão entre o espaço dos grãos e dos poros em uma menor escala. Contudo, caso realmente existam poros nas mesmas faixas de tamanho do espaço entre as partículas, a exclusão do volume de Hg pode causar erros graves, subestimando a porosidade do material.

Para ilustrar esse tipo de problema foi utilizada uma amostra de café moído. Foi escolhida essa amostra por possuir poros relativamente grandes, facilitando a visualização do problema de superposição. A distribuição granulométrica e a morfologia do material, obtidas por análise de imagens por fluxo de partículas (em equipamento Camsizer), são apresentadas na Figura 4.17 e Figura 4.18. A porcentagem de material com granulometria abaixo de 300 μm (fração crítica para a intrusão de Hg) é bem reduzida (cerca de 1,3%); já a morfologia apresenta-se mais alongada e irregular do que a areia de brita.

Figura 4.17 – Distribuição granulométrica por análise de imagens dinâmicas, pó de café

Figura 4.18 – Parâmetros de forma por faixa granulométrica, pó de café

A análise de porosimetria foi realizada utilizando-se duas pressões de enchimento (P.E.): 1 psi e 20 psi. A curva de intrusão de Hg e o diâmetro equivalente de poros para algumas pressões são apresentados na Figura 4.19 e os parâmetros na Tabela 4.8. O ângulo de contato utilizado foi de 130° (valor padrão sugerido pelo fabricante), uma vez que não foi possível realizar a medida neste material.

O gráfico mostra que há um grande pico de intrusão (até cerca de 7 psi) e um segundo (de 7 à 100 psi) na porção assimétrica da curva sobrepondo o primeiro. Em um primeiro momento isso pode parecer como preenchimento dos espaços entre as partículas; contudo, ao se analisar a curva de intrusão com P.E. de 20 psi, nota-se novamente um pico elevado de intrusão de Hg logo nas primeiras pressões (20 psi) até cerca de 200 psi.

A dificuldade nesse caso consiste em determinar em qual pressão o mercúrio está sendo introduzido nos vazios entre partículas e qual a pressão em que o mercúrio penetra efetivamente nos poros intragranulares. Nesse caso, parece ocorrer uma sobreposição dos picos e um maior conhecimento é necessário para se determinar com precisão a porosidade do material.

Figura 4.19 - Comparação dos resultados com diferentes pressões de enchimento

Tabela 4.8 – Resultados da porosimetria por intrusão de Hg com diferentes pressões de enchimento

P.E. (psi)	Vol. Hg (ml/g)	Área superficial (m ² /g)	densidade ap. (g/cm ³)	densidade real (g/cm ³)	Porosidade (%)
1,0	0,597	14,589	0,755	1,375	45,1
20,0	0,208	23,555	1,032	1,313	21,4

Para se verificar se realmente existem poros na faixa de 30 à 2 μm (pressão de 7 à 100 psi) a amostra foi analisada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A Figura 4.20 mostra uma visão geral de alguns grãos do pó de café. É possível notar que os grãos possuem uma enorme quantidade de poros. A Figura 4.21 apresenta um detalhamento dos poros; nota-se que, em sua grande maioria, os poros maiores estão na faixa de 40 à 20 μm , o que equivale a uma faixa de pressão de 4 à 10 psi. Adicionalmente, dentro desses poros maiores, existem poros menores, na faixa de 1 à 6 μm , equivalentes a uma faixa de pressão de 30 à 200 psi.

Sendo assim, a intrusão de mercúrio no espaço entre as partículas e nos poros maiores da amostra ocorre em uma mesma faixa de pressão, não sendo possível distinguir os dois fenômenos. Desse modo, a utilização de uma P.E. mais elevada ou a exclusão do volume de Hg nas pressões mais baixas causaria erros, tanto na distribuição de poros como na porosidade total dessa amostra.

Uma correção que poderia ser feita neste caso, com base nas imagens e medidas feitas no MEV, seria assumir que até 4 psi (que corresponde a poros acima de 45 μm) o volume de Hg foi introduzido apenas no espaço entre as partículas e recalcular os resultados ou realizar um novo ensaio com P.E. de 4 psi. Ainda assim, é provável que ainda ocorram sobreposições do preenchimento entre as partículas e dos poros, resultado em uma porosidade superestimada.

Figura 4.20 – Aspecto geral da amostra de pó de café

Figura 4.21 – Detalhamento dos poros da amostra de pó de café

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

No estudo de materiais particulados, dependendo da amplitude da distribuição granulométrica, da morfologia e do tamanho dos poros da amostra, o problema de sobreposição do Hg no espaço entre os grãos e os poros da amostra será mais ou menos influente, mas estará sempre presente como uma limitação da técnica.

Para casos nos quais não é possível observar os poros dos grãos por meio de microscópios eletrônicos ou outro equipamento com capacidade de magnificação similar, uma saída é analisar a distribuição granulométrica. Desde que a distribuições granulométricas das amostras sejam semelhantes, o erro de sobreposição, caso ocorra, será o mesmo para todas as amostras; portanto, mesmo que a porosidade esteja sub ou superestimada, os resultados são comparáveis.

Quando o objetivo é avaliar a porosidade de materiais particulados com granulometrias distintas, deve-se ficar atento principalmente para a quantidade de material abaixo de 0,30 mm, uma vez que se mostrou como uma faixa de tamanho crítico no aumento da dificuldade de intrusão de Hg na faixa das pressões de enchimento (até 20 psi).

Caso exista uma diferença na quantidade de material abaixo deste tamanho, é recomendável que seja feito um peneiramento em 0,30 mm e as frações retida e passante sejam analisadas separadamente e com pressões de enchimento adequadas. Para os materiais com granulometria acima de 0,30 mm a pressão de enchimento de 20 psi mostrou-se suficiente para preencher os espaços vazios entre os grãos; já para os materiais com granulometria inferior a 0,30 mm a pressão de enchimento adequada irá variar de acordo com o tamanho mínimo dos grãos. Neste estudo as partículas com menores dimensões analisadas eram de cerca de 0,150 mm e apresentaram uma intrusão de mercúrio até pressões próximas de 100 psi.

Para materiais como areias média e grossa, com granulometria na faixa de $-4,8+0,30$ mm (NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997)), a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio apresenta-se como um ensaio rápido (em comparação com o ensaio de absorção de água pelo método do cone), com um procedimento experimental simples e com uma influência reduzida de erro humano, uma vez que as condições do equipamento são mecanizadas, além de permitir analisar a distribuição do tamanho dos poros (além da porosidade).

Já para materiais com granulação de areia fina ou inferior (abaixo de 300 μm) (NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997)), o não preenchimento dos vazios entre as partículas pelo mercúrio, indicará a porosidade total do sistema e não das partículas, o que pode levar a resultados completamente distorcidos e conclusões equivocadas, com valores de porosidade muito superiores à porosidade do agregado em si.

Por fim, o estudo mostrou que a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, apesar de amplamente conhecida e utilizada, possui configurações delicadas de ensaio (escolha da pressão de enchimento) que podem levar a resultados distorcidos, principalmente quando se trabalha com materiais particulados.

Adicionalmente, a comprovação de uma fração crítica no aumento da influência da pressão de enchimento desta técnica representa um avanço na caracterização de materiais particulados e particularmente para agregados miúdos reciclados, pois evidenciam a necessidade de técnicas adequadas para a análise de suas propriedades.

As normas regulamentadoras, que permitem ou não a utilização dos agregados nas diferentes aplicações da engenharia civil, devem ser formuladas para cada tipo de material, como agregado natural ou reciclado e fração grossa ou fina, por exemplo. Desse modo, as propriedades destoantes entre os diferentes tipos de agregados podem ser corretamente quantificadas e sua influência na aplicação mapeada.

Em se tratando de usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição, como dito anteriormente, a granulometria com maior liberação está por volta de $-1,2+0,15$ mm, faixa esta que, como apresentado anteriormente, pode apresentar distorções nos resultados dependendo da proporção de material abaixo de 0,30 mm.

Contudo, considerando-se que numa rota de processamento a granulometria do material gerado não apresente grandes variações, pode-se criar uma amostra padrão sem poros, como esferas de vidro, com a mesma distribuição granulométrica do agregado reciclado produzido para que seja utilizada como correção na análise de porosimetria. Desse modo ter-se-ia uma análise de controle de qualidade do produto gerado.

5 DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIAS DE DIFERENTES MORFOLOGIAS

5.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O objetivo desta etapa foi avaliar o desempenho reológico de argamassas formuladas com agregados miúdos de diferentes morfologias, mantendo-se fixa a distribuição granulométrica e a porosidade.

Para a avaliação do desempenho reológico, bateladas de 4 kg das argamassas (areia+cimento+filler) foram misturadas no reômetro por 2 minutos com rotação constante de 126 RPM. Nos casos em que foi necessária a adição de mais água o procedimento foi repetido.

Após a determinação dos teores de água para obtenção de argamassas com níveis similares de trabalhabilidade (definido através do torque final após a mistura), as formulações foram sujeitas à avaliação reológica através de ciclo de cisalhamento (variação da velocidade de rotação da raquete de mistura) e, posteriormente, a densidade aparente e teor de ar incorporado foram determinados segundo a norma NBR 13278 (ABNT, 1995). Após este procedimento, foram feitas as medidas em mesa de consistência, “squeeze flow” e moldagem dos corpos de prova.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS MIÚDOS

5.2.1 Distribuição granulométrica e morfológica

As curvas de distribuições granulométricas comparativas entre os parâmetros de tamanho de partículas analisados pelo Camsizer e os resultados obtidos por difração a laser de baixo ângulo e por peneiramento a úmido são apresentadas na Figura 5.1.

Apesar dos diferentes resultados de distribuição de tamanho de partículas, o parâmetro x_{min} é o que mais se aproxima dos resultados do peneiramento, e que praticamente não existem diferenças entre as amostras em questão, independentemente do parâmetro utilizado.

A esfericidade e relação de aspecto médios das amostras são apresentadas na Tabela 5.1. A diferença entre a amostra mais esférica e a menos esférica é de 0,03 e para a relação de aspecto essa diferença é de 0,05. Contudo, deve-se destacar que

são médias de milhares de partículas, e podem ser semelhantes mesmo que a distribuição ao longo do intervalo considerado seja distinta. Dessa forma, deve-se avaliar não somente o valor médio, mas também as distribuições dos parâmetros ao longo do intervalo granulométrico garantindo assim que nenhuma informação seja perdida.

Figura 5.1 - Distribuição granulométrica das diferentes areias

Tabela 5.1 – Parâmetros médios de forma das diferentes areias

Parâmetros de forma	Areia de diferentes origens		
	Fluvial	IPT	Cajamar
Esfericidade média	0,826	0,795	0,807
b/l médio	0,723	0,71	0,674

A distribuição de partículas por classes de esfericidade para cada amostra é apresentada na Figura 5.2. A amostra Fluvial possui cerca de 70% das partículas com esfericidade acima de 0,8, seguida a amostra Cajamar (60%) e IPT (50%), demonstrando que a areia padrão IPT é a que apresenta partículas com contornos mais irregulares.

Figura 5.2 – Frequência acumulada abaixo versus esfericidade de partículas

Adicionalmente vê-se que a amostra Fluvial apresenta uma tendência ao aumento da esfericidade para as frações finas, ao contrário das outras amostras (Figura 5.3). Destaca-se também o fato de que as amostras possuem cerca de 40% em massa com granulometria entre $-0,60+0,30$ mm, intervalo no qual os valores de esfericidade variam entre 0,82 e 0,84 para a amostra Fluvial e matem-se em 0,79 para a IPT e 0,80 para a Cajamar.

Figura 5.3 – Esfericidade média por faixa granulométrica

Com relação ao parâmetro b/l , as amostras Fluvial e IPT apresentam valores notoriamente mais elevados do que a amostra Cajamar (Figura 5.4). A amostra Cajamar possui cerca de 35% das partículas com b/l abaixo de 0,6, enquanto que para as amostras Fluvial e IPT essa proporção é de 20%.

Figura 5.4 – Frequência acumulada abaixo versus relação de aspecto das partículas

Analisando a relação de aspecto (b/l) médio por faixa granulométrica, percebe-se que a amostra Fluvial apresenta valores praticamente constantes e acima de 0,7. Para a areia padrão IPT os valores são mais baixos e apresentam um pequeno decréscimo para as frações finas. Já para a areia artificial de Cajamar, as partículas

tornam-se mais irregulares nas frações mais finas, demonstrando que a britagem gera partículas grossas mais arredondadas e finas mais irregulares, conforme já citado na discussão de resultados de areias de RCD geradas no VSI (HAWLITSCHEK, ULSEN, *et al.*, 2013).

Figura 5.5 – Relação de aspecto média por faixa granulométrica

Apesar dos valores médios não apresentarem diferenças significativas, a análise dos parâmetros por faixa granulométrica indica diferenças consideráveis na morfologia das partículas. A amostra Fluvial é a que possui morfologia mais esférica e com melhor relação de aspecto, a amostra Cajamar possui esfericidade semelhante à da amostra IPT, porém, sua relação de aspecto é a pior dentre as três. De uma maneira mais simplificada, a ordem esfericidade decresce na ordem: FLUVIAL>CAJAMAR>IPT; e a ordem de relação de aspecto: FLUVIAL>IPT>CAJAMAR.

5.2.2 Porosidade e massa específica

Os resultados da porosidade e massa específica são apresentados na Tabela 5.2. A porosidade é da ordem de 1% para todas as amostras, valor notadamente baixo e que garante que não ocorrerá aumento do consumo de água devido à absorção pelas partículas.

A massa específica da areia de brita é superior à das areias fluvial e do IPT (que também é de origem fluvial) porque incorpora minerais mais densos que o quartzo, oriundos das rochas que foram britadas.

Tabela 5.2 – Porosidade e massa específica

Parâmetros	Areia de diferentes origens		
	fluvial	IPT	brita
Massa específica real (g/cm ³)	2,687	2,735	2,815
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,635	2,654	2,759
Porosidade (%)	0,99	0,85	1,01
Superfície específica (BET) (m ² /g)	0,56	0,28	0,27

5.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO REOLÓGICO

5.3.1 Preparação das argamassas

As misturas foram compostas segundo uma proporção em volume de 75% de areia (-1,2+0,15 mm) e 25% de finos (<0,15 mm), sendo 12,5% de cimento CPIIF e 12,5% de filler calcário, ambos provenientes de Itaú de Minas (MG). A proporção em massa dos ingredientes foi calculada considerando as respectivas densidades determinadas por picnometria com intrusão de gás hélio. Para os estudos de reometria foram utilizado 4.0 kg de material, sendo as composições apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Composição das argamassas

Material	Composição (% em massa)		
	Fluvial	IPT	Cajamar
Filler	12,7	12,8	12,2
Cimento	14,3	14,4	13,7
Areia	73,0	72,9	74,2

5.3.2 Estado fresco

A Figura 5.6 apresenta as curvas de mistura para as argamassas durante a determinação do teor de água necessário para que atingissem o mesmo torque de

mistura de 0,8 N.m⁷. Inicialmente as argamassas foram misturadas com o mesmo teor de água (13%, em massa). A partir do segundo ciclo foram adicionadas pequenas quantidades de água até chegar ao torque de referência para argamassas padrão.

Figura 5.6 – Curvas de mistura para argamassas com diferentes conteúdos de água

Figura 5.7 – Distribuição das fases das argamassas

⁷ O torque de 0,8 N.m foi utilizado como “padrão” pois resultou em uma boa consistência (avaliada visualmente) para a argamassa Fluvial.

Já na fase seca (primeiros 10 s, destacados em vermelho), na qual a diferença de morfologia tem maior influência, é visível a diferença do torque de mistura, aumentando para as areias mais alongadas (Fluvial<IPT<Cajamar). No primeiro ciclo a amostra Fluvial, apenas com a primeira adição de água já apresentou o “ponto de virada”, no qual ocorre um pico do torque até valores próximos a 1,5 N.m, indicando um comportamento de argamassa simples.

A amostra IPT, após a primeira adição não apresentou o ponto de virada, permanecendo com torques elevados (por volta de 2,0 N.m) e aspecto de farofa, indicando a necessidade de mais água. Para a amostra Cajamar a primeira adição de água também não foi suficiente, os torques atingiram valores ainda mais elevados do que as demais amostras (por volta de 2,5 N.m).

Para a amostra Fluvial foi adicionado apenas mais 0,5% de água para se obter o torque padrão, totalizando 13,5% de água, em massa; para a amostra IPT foi adicionado mais 3% de água, totalizando 16% de água; na amostra Cajamar, foram adicionados mais 5% de água, totalizando 18% de água em massa.

O consumo de água para que a mistura atinja a trabalhabilidade adequada para uso em argamassa está relacionado à distribuição granulométrica, à porosidade, superfície específica e morfologia das partículas. Como as três primeiras variáveis foram mantidas constantes para as três amostras, o maior consumo de água está relacionado à forma das partículas.

A Figura 5.8 mostra o consumo de água para os valores médios de esfericidade e relação de aspecto das areias estudadas. O teor de água necessário para que as argamassas alcançassem o torque de mistura seguiu a ordem crescente: FLUVIAL<IPT<CAJAMAR; inversa à de relação de aspecto.

Figura 5.8 – Relação entre a forma das partículas e o consumo de água para um mesmo torque de mistura medido no reômetro

Tomando-se como parâmetro a areia Fluvial, a amostra IPT possui esfericidade 4% e relação de aspecto 2% menores, o que impactou um consumo de 18,5% a mais de água para atingir o mesmo torque de trabalho; já a amostra Cajamar, com esfericidade 2% e relação de aspecto 7% menores, teve um consumo de água 33% maior.

Os resultados dos ciclos de cisalhamento e da mesa de consistência são apresentados na Figura 5.9 e Figura 5.10. As curvas dos ciclos de cisalhamento indicam que as argamassas possuem a mesma natureza reológica: pseudoplástica com baixa tensão de escoamento. Adicionalmente, no ensaio em mesa de consistência as argamassas apresentaram espalhamento na faixa de 300 mm, também indicando uma consistência semelhante.

Desse modo, apesar das diferenças na morfologia das areias resultarem em um maior consumo de água, o comportamento reológico resultante é semelhante para as argamassas, uma vez que o torque de mistura medido pelo reômetro é o mesmo.

Figura 5.9 - Curvas reológicas das argamassas

Figura 5.10 - Correlação dos resultados da mesa de consistência com a quantidade de água adicionada na argamassa

As curvas de carga x deslocamento, obtidas por meio do ensaio de squeeze-flow, são ilustradas na Figura 5.11. De um modo geral, todas as argamassas apresentaram um baixo deslocamento, inferior a 3,5 mm e um perfil que praticamente não possui deformação plástica, passando direto do estágio de deformação elástica para o de enrijecimento por deformação, com um expressivo aumento das cargas para pequeno incremento nos deslocamentos. Esse tipo de comportamento caracteriza

argamassas de difícil aplicação (CARDOSO, 2009), como composições sem aditivos normalmente preparadas em obra.

Apesar de todas as argamassas estarem com o mesmo tipo de comportamento (medido pelos ciclos de cisalhamento e mesa de consistência), verifica-se que a argamassa Cajamar apresenta uma menor fluidez. Tal fenômeno é resultado do maior teor de água demandado pelos grãos alongados da amostra.

A necessidade de uma maior distância entre os grãos alongados para que, durante seu movimento, resultassem em um mesmo comportamento reológico (medido pelos ciclos de cisalhamento e mesa de consistência), também resultou em uma menor coesão da argamassa, o que dificultaria sua aplicação.

Figura 5.11 - Resultados do ensaio squeeze-flow

5.3.3 Avaliação das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das argamassas são sumarizadas na Tabela 5.4. A porosidade dos corpos de prova foi mais reduzida para a argamassa Fluvial e bem semelhante para as argamassas IPT e Cajamar. Estes valores estão de acordo com a soma dos volumes de água e ar incorporado no estado fresco (Fluvial=31,4%, IPT=35,5%, Cajamar=35,7%). Isso reafirma a tendência mostrada por (CARDOSO, 2009), na qual a porosidade dos corpos de prova no estado endurecido apresenta uma estreita correlação com a soma dos teores de água e ar no estado fresco.

A resistência mecânica à compressão foi próxima para as 3 argamassas, sendo ligeiramente mais elevada para a argamassa Fluvial, a qual possui a menor porosidade no estado endurecido.

Tabela 5.4 – Propriedades dos corpos de prova das argamassas (28 dias de cura)

Amostras	Densidade aparente (g/cm ³)	Porosidade (%)	Resistência mecânica à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Fluvial	1,99	27,5	2,62	23,7
IPT	1,90	30,8	2,41	22,9
Cajamar	1,96	30,6	2,42	20,6

5.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

No estudo do desempenho reológico de argamassas formuladas com agregados miúdos de diferentes morfologias foram utilizadas três areias naturais. As morfologias foram caracterizadas por meio da técnica de análise de imagens por fluxo dinâmico com o equipamento Camsizer.

A relação de aspecto mostrou-se um parâmetro mais influente no comportamento reológico para a fração granulométrica acima de 0,15 mm, resultando em um aumento no consumo de água de cerca de 30%. Uma possível explicação é o fato das partículas alongadas terem maior dificuldade de movimentação.

Quando o sistema é agitado, as partículas seguem um movimento desordenado girando em torno do próprio eixo, sendo assim, partículas mais cúbicas (b/l próximo de 1,0) tem um movimento de rotação umas sobre as outras sem interferir na vizinhança, demandando uma energia de mistura menor. Já partículas mais alongadas, durante seu movimento, precisam deslocar as partículas vizinhas e ainda sofrem mais influência com a viscosidade do sistema, aumentando assim a energia de mistura.

Para que partículas alongadas tenham a mesma facilidade de movimentação que partículas esféricas, é necessário que elas estejam mais afastadas umas das outras, para que possam se movimentar sem precisar deslocar as partículas vizinhas, como mostra a Figura 5.12.

Figura 5.12 – Ilustração do aumento do consumo de água de um meio com partículas alongadas em relação a um meio com partículas esféricas para que ambos tenham a mesma viscosidade ((PILEGGI, 2001) modificada)

Com a possibilidade de quantificar diferenças na morfologia das partículas (por meio de equipamentos de análise de imagens por fluxo dinâmico como o CAMSIZER) e correlacioná-las com o aumento resultante do consumo de água para que as partículas fluam com a mesma facilidade (por meio da reometria rotacional), seria interessante estudar amostras com mesma densidade (real e aparente) e distribuição granulométrica, com morfologia distinta, para que a forma das partículas fossem introduzidas no conceito de distância de separação interparticular (IPS).

Por exemplo, quanto mais alongadas forem as partículas (menor b/l), maior será a distância necessária para que elas fluam com a mesma facilidade de partículas esféricas com a mesma granulometria, ou seja, partículas mais alongadas resultariam em um valor de IPS mais elevado.

6 DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIAS DE DIFERENTES POROSIDADES

6.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O objetivo desta etapa foi avaliar o desempenho reológico de argamassas formuladas com areias recicladas de diferentes porosidades. Esta etapa do estudo pode ser dividida em 2 etapas principais:

Etapa 1

Objetivo: Encontrar o teor de água necessário para cada argamassa que resulte em uma boa trabalhabilidade e avaliar a estabilidade para um período de aplicação de 1 hora.

1ª Rodada: torque alvo de mistura de 1 N.m (alto teor de água).

2ª Rodada: torque alvo de mistura de 2 N.m (baixo teor de água).

Avaliação da estabilidade no tempo: teor de água dosado na 2ª rodada e avaliação do teor de ar incorporado e do torque resultante no ciclo de cisalhamento ao longo de 1 hora.

Etapa 2

Objetivo: Estudar a influência de aditivos, usualmente aplicados na indústria, em agregados reciclados.

3ª Rodada: teor de água dosado na 2ª rodada com a incorporação de um aditivo incorporador de ar (AIA - Lauril Sulfato de Sódio – Texapon ZAD) e um retentor de água (Metil Hidroxi Etil Celulose – MHEC, Tylose 100012P6). Foi utilizada a mesma quantidade de aditivos para todas as argamassas.

4ª Rodada: teor de água dosado na 2ª rodada com a utilização de diferentes dosagens de aditivos, de modo a se compreender o consumo destes pelos agregados reciclados.

A 1ª rodada, com um teor mais elevado de água, foi realizada com o objetivo de avaliar se a absorção de água das areias recicladas (VSI-NÃOmag, VSI-PB e VSI-mag) seria influente a ponto de comprometer a trabalhabilidade da argamassa ao longo do tempo de realização dos ensaios.

Para todos os experimentos, bateladas de 4 kg das argamassas (areia+cimento) foram misturadas no reômetro por 2 minutos com rotação constante

de 126 RPM. Nos casos em que foi necessária a adição de mais água, o procedimento foi repetido.

Após a determinação dos teores de água para obtenção de argamassas com níveis similares de trabalhabilidade (definido através do torque final após a mistura), as formulações foram sujeitas à avaliação reológica através de ciclo de cisalhamento (variação da velocidade de rotação da raquete de mistura) e, posteriormente, determinadas a densidade aparente e teor de ar incorporado segundo a norma NBR 13278 (ABNT, 1995).

Após este procedimento, foi avaliada a dispersão das argamassas em mesa de consistência, “squeeze flow” e moldagem dos corpos de prova. Cada etapa de moldagem dos corpos de prova (para avaliação de resistência mecânica no estado endurecido) foi realizada a partir de uma batelada (mistura no reômetro) diferente. Sendo assim, todas as curvas de mistura, ciclos de cisalhamento e medidas de densidade aparente e teor de ar incorporado possuem duplicatas.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS AREIAS

6.2.1 Distribuição granulométrica e morfologia

As curvas de distribuição granulométrica obtidas por difração de luz laser de baixo ângulo e por análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas são apresentadas na Figura 6.1a e b. As areias apresentam uma distribuição granulométrica no intervalo -1,2+0,15 mm. Desse modo, a distribuição de tamanho de partículas não será um parâmetro influente nos seus desempenhos em argamassas.

Figura 6.1 – Distribuição granulométrica das areias por diferentes técnicas

Os parâmetros de tamanho e forma das areias são sumarizados na Tabela 6.1. Conforme explicado no capítulo anterior, quanto menores os valores de relação de aspecto (b/l), mais alongadas serão as partículas; já o parâmetro esfericidade, está relacionado com a angulosidade da partícula, a irregularidade do seu perímetro projetado. Quanto mais esféricas forem as partículas e mais regulares forem suas superfícies, melhor será a fluidez da argamassa no estado fresco.

A esfericidade média apresenta-se bem similar para todas as areias, já a relação de aspecto é mais elevada para a areia IPT e mais baixa para a areia Cajamar. Contudo, deve-se destacar que são médias de milhares de partículas, sendo assim, é preciso analisar os parâmetros de um extremo a outro garantindo que nenhuma informação seja sobreposta.

Tabela 6.1 – Sumário da distribuição de tamanho (mm) e parâmetros de forma das partículas

Parâmetros	Amostras				
	IPT	Cajamar	VSI-NAOmag	VSI-PB	VSI-mag
D[10]	0,199	0,189	0,204	0,178	0,179
D[50]	0,517	0,519	0,468	0,436	0,474
D[90]	1,097	1,091	0,943	0,933	0,987
D[médio]	0,598	0,585	0,524	0,501	0,531
SPAN	1,736	1,738	1,579	1,732	1,704
esfericidade média	0,795	0,805	0,797	0,794	0,794
b/l média	0,706	0,673	0,696	0,694	0,688

xc_min. = menor valor dentre os diâmetros máximos considerando as distintas orientações de medida.

D[10] = diâmetro xc_min abaixo do qual estão 10% das partículas.

D[50] = diâmetro xc_min abaixo do qual estão 50% das partículas.

D[90] = diâmetro xc_min abaixo do qual estão 90% das partículas.

D[médio] = diâmetro xc_min médio.

Relação de aspecto (b/l) = razão entre o maior e o menor diâmetro da partícula.

SPAN = amplitude da distribuição granulométrica, definido por $(D[90]-D[10]) / (D[50])$.

Esfericidade (SPHT) = relação entre a área da partícula e seu perímetro, definida por $(4\pi \cdot \text{Área} / \text{Perímetro}^2)$.

A distribuição de partículas por classes de esfericidade para cada amostra é apresentada na Figura 6.2. Praticamente não se vê diferença na distribuição de esfericidade entre as areias. Adicionalmente, analisando as esfericidades médias por intervalo granulométrico (Figura 6.3), vê-se mais uma vez que não há uma diferença significativa entre a esfericidade das areias utilizadas, com exceção da areia Cajamar que apresenta valores ligeiramente mais elevados para as frações acima de 0,50 mm. Destaca-se também o fato de que as amostras possuem cerca de 40% em massa com granulometria entre -0,60+0,30 mm, intervalo no qual a maior diferença entre a esfericidade das amostras é de 0,01.

Figura 6.2 – Frequência acumulada abaixo versus esfericidade das partículas

Figura 6.3 – Esfericidade ao longo do intervalo granulométrico

Com relação ao parâmetro b/l , a areia IPT apresenta valores notoriamente mais elevados e a areia Cajamar valores mais baixos, ficando as areias recicladas com valores intermediários. A amostra Cajamar possui cerca de 35% das partículas com b/l abaixo de 0,6, enquanto que para a amostra IPT essa proporção é de 20% e para as areias recicladas 30%.

Analisando a relação de aspecto (b/l) médio por faixa granulométrica, percebe-se que a areia IPT apresenta valores frequentemente mais elevados, em relação às demais amostras, ao longo do intervalo; já a areia Cajamar possui valores notoriamente mais baixos durante todo intervalo.

Figura 6.4 - Frequência acumulada abaixo versus relação de aspecto das partículas

Figura 6.5 – Relação de aspecto ao longo do intervalo granulométrico

Apesar dos valores médios não apresentarem diferenças significativas, a análise dos parâmetros por faixa granulométrica indica diferenças consideráveis na morfologia das partículas. O parâmetro esfericidade não apresenta diferenças significativas entre as areias analisadas; já com relação ao parâmetro b/l, a areia IPT é a que possui os valores mais elevados, a areia Cajamar os valores mais baixos e as areias recicladas valores intermediários, sem diferenças significativas entre si. Desse modo, considerando-se que a porosidade das areias IPT e Cajamar sejam igualmente baixas, é possível prever que a areia Cajamar necessite de um teor maior de água para alcançar a mesma trabalhabilidade da areia IPT devido a sua forma mais alongada.

6.2.2 Composição química e mineralógica

A composição química das amostras é apresentada na Tabela 6.2. A areia IPT é composta fundamentalmente por quartzo (SiO_2), enquanto que a areia Cajamar por agregados calcários (maiores teores de $\text{CaO}+\text{PF}$ e Mg e menor teor de SiO_2). Para os agregados reciclados, uma vez que estes possuem um conteúdo significativamente baixo de agregados calcários, o teor de $\text{CaO}+\text{PF}$ esta relacionado com o teor de pasta de cimento remanescente (ULSEN, 2011). Desse modo nota-se que a areia VSI-NÃOmag é a que possui menor teor de pasta de cimento aderida e a areia VSI-mag a que possui o maior teor.

Tabela 6.2 – Composição química das amostras estudadas

Amostra	Teores (%)						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$\text{CaO}+\text{PF}$	$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	MgO	outros
IPT	97,0	1,22	0,65	...	...	<0,10	0,21
Cajamar	14,4	2,54	1,36	76,8	0,77	4,58	0,13
VSI-NÃOmag	79,8	6,07	1,45	7,98	3,34	0,55	0,00
VSI-PB	71,5	8,09	2,59	11,8	3,59	1,11	0,66
VSI-mag	58,1	10,6	4,65	19,0	4,05	2,01	0,95

Outros = MnO , TiO_2 e P_2O_5

6.2.3 Densidade, porosidade e superfície específica (BET)

As medidas de porosidade, densidade real e aparente e superfície específica das areias são sumarizadas na Tabela 6.3. Nota-se que, para as areias recicladas, quanto maior o teor de $\text{CaO}+\text{PF}$ (Tabela 6.2), maior sua porosidade e área específica.

Tabela 6.3 – Densidade (ρ), porosidade e área superficial (BET) das amostras

Amostras	MEA (He) (g/cm ³)	Porosidade (%)	Área específica (m ² /g)	Área específica volum. (m ² /cm ³)
IPT	2,69	0,85	0,28	0,74
Cajamar	2,79	1,11	0,27	0,74
VSI-NÃOmag	2,65	5,25	1,76	4,66
VSI-PB	2,62	11,3	3,49	9,15
VSI-mag	2,60	19,4	6,66	17,3

Área específica medida pelo método do BET

Analisando-se os valores de porosidade e área de superfície específica das areias, nota-se que há uma estreita correlação entre eles (Figura 6.6). Os valores de porosidade, para a areia natural IPT e britada Cajamar, são bem reduzidos (por volta de 1%), assim como os valores de superfície específica (por volta de 0,74 m²/cm³); já para as areias recicladas, esses valores aumentam acentuadamente. Para a areia VSI-NÃOmag, tanto porosidade quanto superfície específica são cerca de 5 vezes maiores, para a areia VSI-PB cerca de 10 vezes maiores e para a VSI-mag, cerca de 20 vezes maiores.

Figura 6.6 – Relação entre área superficial (BET) e porosidade (por intrusão de Hg)

A curva de intrusão de mercúrio acumulada para cada tamanho de poro equivalente para as areias recicladas é apresentada na Figura 6.7. O diâmetro médio de poros é de cerca de 20 nm para as areias VSI-PB e VSI-mag e cerca de 35 nm para a areia VSI-NAOmag.

Figura 6.7 - Volume de Hg introduzido para cada diâmetro de poro

6.3 FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas foram preparadas utilizando uma proporção em volume: de 75% de areia e 25% de cimento CPIIF (densidade $3,10 \text{ g/cm}^3$ e superfície específica de $3,43 \text{ m}^2/\text{cm}^3$), proveniente da fábrica da Votorantim em Itaú de Minas (MG). A proporção em massa foi calculada considerando-se a densidade determinada por picnometria por intrusão de gás hélio (Tabela 6.4),

Tabela 6.4 – Formulações das argamassas

MP (% massa)	Composição (% em massa)				
	IPT	Cajamar	VSI-NÃOmag	VSI-PB	VSI-mag
Cimento	27,9	27,1	28,1	28,3	28,5
IPT	72,2				
Cajamar		72,9			
VSI-NÃOmag			71,9		
VSI-PB				71,7	
VSI-mag					71,5
Total	100	100	100	100	100

Como dito anteriormente, a distribuição granulométrica das areias foi fixada, garantindo assim que este não seja um parâmetro influente no seu desempenho em argamassas (Figura 6.8 - resultados de análises de imagens por fluxo dinâmico).

Figura 6.8 – Distribuição granulométrica das argamassas (areia+cimento)

6.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

6.4.1 Rodada 1 – mistura mais fluida (teor de água elevado)

Conforme explicitado anteriormente, esta rodada, com um teor mais elevado de água, foi realizada com o objetivo de avaliar se a absorção de água das areias recicladas (VSI-NÃOmag, VSI-PB e VSI-mag) seria influente a ponto de comprometer a trabalhabilidade da argamassa ao longo do tempo de realização dos ensaios.

A Figura 6.9 apresenta as curvas de mistura das argamassas durante a determinação do teor de água necessário para atingir o mesmo torque de mistura de 1 N.m.

Inicialmente, foi adicionada uma mesma quantidade água (15% em massa) para todas as misturas. Neste primeiro ciclo é notória a diferença de comportamento entre as argamassas. A argamassa IPT atingiu torques máximos de cerca de 3 N.m e já apresentou o ponto de virada (transição de comportamento de material descontínuo para um fluido).

A argamassa Cajamar também atingiu torques máximos por volta de 3 N.m, contudo, a água adicionada não foi suficiente para que atingisse seu ponto de virada; já para as argamassas recicladas, nenhuma alcançou seu ponto de virada e os torques máximos foram acentuadamente maiores do que as argamassas comerciais, chegando a 7 N.m para a argamassa VSI-mag, com maior porosidade. A argamassa

VSI-NAOmag, menos porosa, atingiu torques de mistura elevados, porém, significativamente menores do que as demais argamassas recicladas.

Os resultados evidenciam maior demanda de água na formulação de argamassas com areias porosas. A Figura 6.10 apresenta a correlação entre o aumento no torque de mistura do reômetro e a porosidade dos grãos para a adição de 15% de água, em massa. A alta correlação indica que logo nos primeiros segundos nos quais a água é adicionada, ela é consumida no preenchimento dos poros das areias recicladas, sobrando assim uma menor quantidade de água no sistema para afastar as partículas e facilitar sua mobilidade.

Figura 6.9 – Curvas de mistura para determinação do consumo de água das argamassas - 1 rodada (% de água em massa)

Figura 6.10 - Correlação entre o torque de mistura resultante e a porosidade das areias para uma adição de 15%, em massa, de água nas argamassas

Nos procedimentos de mistura posteriores, foram adicionadas pequenas quantidades de água até que as argamassas alcançassem o torque de 1 N.m. Ao final a ordem crescente do consumo de água das argamassas ficou: IPT (16,5%) < Cajamar (17,0%) < VSI-NAOmag (18,5%) < VSI-PB (20,75%) < VSI-mag (27,5%), conforme Tabela 6.5. A relação água/cimento (a/c) é também indicada na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Teor de água final para torque de 1N.m e relação água/cimento – 1 rodada

Parâmetros	Argamassa				
	IPT	Cajamar	VSI-NAOmag	VSI-PB	VSI-mag
Água (%massa)	16,5	17	18,5	20,75	27,5
a/c	0,59	0,63	0,66	0,73	0,96

Posteriormente, foi realizada outra rodada com a adição direta da água dosada na rodada anterior (Figura 6.11).

Com a adição direta, os torques máximos de mistura das argamassas, principalmente os das recicladas, foram bem reduzidos, mas com a mesma tendência de comportamento: energia de mistura menor para as argamassas comerciais e crescente para as recicladas conforme o aumento de porosidade. Ao final do ciclo de mistura, todas argamassas alcançaram o ponto de virada, estabilizando-se muito próximas a 1 N.m.

Figura 6.11 – Curvas de mistura das argamassas – 1 rodada

A Figura 6.12 apresenta a proporção volumétrica das fases das argamassas no estado fresco. Nota-se que as argamassas recicladas apresentam teor de ar incorporado superiores aos das comerciais.

Figura 6.12 – Distribuição de fases das argamassas – 1 rodada

Os resultados dos ciclos de cisalhamento, apresentados na Figura 6.13, indicam que as argamassas possuem a mesma natureza reológica: pseudoplástica com baixa tensão de escoamento.

Figura 6.13 – Curvas reológicas das argamassas – 1 rodada

A Tabela 6.6 apresenta os resultados do espalhamento em mesa de consistência para as argamassas. Nota-se que todas as argamassas apresentam espalhamento na faixa de 300 mm, indicando uma baixa consistência. Isto se deve ao teor de água utilizado, acima dos utilizados industrialmente. Desse modo, faz-se necessário uma dosagem com menores teores de água.

Adicionalmente, as areias recicladas (VSI-NÃOmag, VSI-PB e VSI-mag) apresentaram uma leve mudança na trabalhabilidade durante a realização dos ensaios, mas não ao ponto de prejudicar sua aplicação. Sendo assim, foi realizada a rodada 2, com um torque final de mistura de 2 N.m, consumindo menos água e proporcionando argamassas mais consistentes e passíveis de serem aplicadas.

Tabela 6.6 – Espalhamento das argamassas na mesa de consistência – 1 rodada

Rodada	Espalhamento (mm)				
	IPT	Cajamar	VSI-NAOmag	VSI-PB	VSI-mag
1	332	312	301	304	310

6.4.2 Rodada 2 – mistura mais consistente (teor de água reduzido)

Nesta segunda rodada o torque final de mistura alvo foi de 2 N.m, consumindo menos água e proporcionando argamassas mais consistentes, passíveis de serem aplicadas. As curvas de mistura do processo de determinação do teor de água necessário para cada argamassa são apresentadas na Figura 6.14. Nesta rodada as adições de água foram feitas com base nos resultados obtidos na primeira rodada.

Figura 6.14 - Curvas de mistura para determinação do consumo de água das argamassas - 2 rodada (% de água em massa)

As curvas de mistura da rodada com a adição direta da água determinada são apresentadas na Figura 6.16 e a relação a/c na Tabela 6.7.

Ao final do ciclo de mistura, todas argamassas alcançaram o ponto de virada, estabilizando-se em 2 N.m. Adotando-se a argamassa IPT como referência, nota-se que a argamassa Cajamar consumiu 7% a mais de água, aumento este que pode ser atribuído à diferença de forma dos grãos (mais alongados para a areia Cajamar). A argamassa VSI-NAOmag (porosidade de 5,25%) consumiu 12% a mais de água em comparação com a argamassa IPT e apenas 5% a mais em comparação à argamassa Cajamar; para a argamassa VSI-PB (porosidade de 11,31%) o aumento de consumo de água foi de 30% em comparação à argamassa IPT e 20% à Cajamar; já a argamassa VSI-mag (porosidade de 19,41%) consumiu 70% a mais em relação à IPT e 60% à Cajamar.

Tabela 6.7 – Teor de água final para torque de 1N.m e relação água/cimento – 2 rodada

Parâmetros	Argamassa				
	IPT	Cajamar	VSI-NAOmag	VSI-PB	VSI-mag
Água (%massa)	14,5	15,25	16,0	18,25	24,0
a/c	0,52	0,57	0,58	0,66	0,88

A Figura 6.15 apresenta a correlação entre a porosidade e a a/c de cada areia. Nota-se que, uma vez que a granulometria é fixada, a porosidade dos grãos (diretamente relacionada com sua superfície específica) acaba controlando o consumo de água nas argamassas para que adquiram uma mesma trabalhabilidade.

Figura 6.15 – Correlação entre a porosidade dos grãos e a relação a/c obtida – 1 e 2 rodada

Figura 6.16 – Curva de mistura das argamassas - 2 rodada

A Figura 6.17 apresenta a proporção volumétrica das fases das argamassas no estado fresco. Nota-se, mais uma vez, que as argamassas recicladas possuem um teor de ar incorporado superior aos das comerciais.

Figura 6.17 – Distribuição de fases das argamassas – 2 rodada

Os resultados dos ciclos de cisalhamento (Figura 6.18) indicam argamassas pseudoplásticas, com alta tensão de escoamento (ligeiramente mais elevada para as argamassas recicladas) e viscosidade moderada.

Figura 6.18 – Curvas reológicas das argamassas – 2 rodada

Os resultados da mesa de consistência (Tabela 6.8) mostram que os espalhamentos das argamassas ficaram todos na faixa de 250 mm, indicando um

aumento da consistência das argamassas em relação à primeira rodada (espalhamentos acima de 300 mm).

Tabela 6.8 – Espalhamento das argamassas na mesa de consistência – 2 rodada

Rodada	Espalhamento (mm)				
	IPT	Cajamar	VSI-NAOmag	VSI-PB	VSI-mag
2	259	274	244	248	246

As curvas de carga x deslocamento, obtidas por meio do ensaio de squeeze-flow, são ilustradas na Figura 6.19. De um mosto geral, todas as argamassas apresentaram um baixo deslocamento, inferior a 2,5 mm e um perfil que praticamente não possui deformação plástica, passando direto do estágio de deformação elástica para o de enrijecimento por deformação, com um expressivo aumento das cargas para pequeno incremento nos deslocamentos. Esse tipo de comportamento caracteriza argamassas de difícil aplicação (CARDOSO, 2009), como composições sem aditivos normalmente preparadas em obra.

Apesar de todas as argamassas estarem com o mesmo tipo de comportamento, verifica-se que as argamassas com areias não-recicladas fluem um pouco mais nos testes de squeeze-flow, mesmo com quantidades consideravelmente menores de água. Os maiores valores de porosidade/área superficial das areias recicladas, aparentemente, deixam menos água disponível para a pasta aumentando a viscosidade desta e, conseqüentemente, reduzindo a facilidade de fluxo das argamassas.

Da mesma forma ocorrida na rodada 1, nesta rodada as argamassas recicladas (VSI-NÃOmag, VSI-PB e VSI-mag) apresentaram uma certa perda de trabalhabilidade ao longo do tempo em que foram realizados os ensaios. Dessa forma, aparentemente o que acontece é que as areias recicladas absorvem a água do sistema com o tempo, pois a perda de fluidez/trabalhabilidade é muito intensa para as formulações que as contém, conforme verificado durante os experimentos / moldagens.

Figura 6.19 – Resultados do ensaio squeeze-flow – 2 rodada

6.4.3 Avaliação da estabilidade das argamassas ao longo do tempo

Esta etapa do estudo é importante, pois, como dito anteriormente, os agregados reciclados possuem uma porosidade elevada em comparação aos agregados naturais. Desse modo, apesar do teor de água dosado para que tenham um mesmo torque de mistura, é preciso saber se a porosidade dos agregados de RCD não acabará consumindo a água do sistema, fazendo com que a argamassa perca a trabalhabilidade desejada.

Para avaliar a estabilidade das argamassas foi realizado o procedimento ilustrado na Figura 6.20. O teor de água utilizado foi o dosado na 2ª rodada, uma vez que proporcionou argamassas mais consistentes e passíveis de serem aplicadas. As areias utilizadas foram: IPT (referência natural com porosidade praticamente nula), VSI-NÃOmag (areia de RCD menos porosa) e VSI-mag (areia de RCD mais porosa).

Figura 6.20 – Fluxograma do experimento para avaliação da estabilidade das argamassas no tempo

As curvas de mistura da rodada com a adição direta da água são apresentadas na Figura 6.21 e a proporção volumétrica inicial das fases (medida após o ciclo 1) na Figura 6.22.

Figura 6.21 - Curvas de mistura das argamassas – estabilidade no tempo

Figura 6.22 - Distribuição de fases das argamassas – estabilidade no tempo (t = 0 min.)

Os toques resultantes dos ciclos de cisalhamento para as argamassas são ilustrados na Figura 6.23 e o teor de ar incorporado ao longo do tempo é apresentado na Tabela 6.9. Assim como nas rodadas anteriores, as argamassas apresentam pequenas diferenças entre elas, contudo, essas diferenças não se acentuaram no tempo analisado (1 hora). O teor de ar também não mostrou alterações.

Tabela 6.9 – Teor de ar das argamassas ao longo do tempo

Argamassas	Teor de ar (%)		
	ciclo 1 t = 0 min.	ciclo 2 t = 30 min	ciclo 3 t = 60 min
IPT	5,81	5,82	6,23
VSI-NÃOmag	11,57	11,94	12,23
VSI-mag	11,22	11,88	11,30

Observando-se as curvas de ida (aumento das taxas de cisalhamento), nota-se que, com o passar do tempo, os torques de mistura nas taxas de cisalhamento mais baixas (até 100 RPM) aumentam para as areias mais porosas.

Contudo, sob altas taxas de cisalhamento (126 RPM em diante) os torques de mistura são praticamente iguais para todas as argamassas durante todo o tempo analisado. Já nas curvas de volta (redução das taxas de cisalhamento), o torque de mistura é similar em todas as taxas de cisalhamento durante todo o tempo analisado.

Esses resultados indicam que, provavelmente, o que acaba controlando as reações do sistema não é a porosidade, mas sim a superfície específica. As areias recicladas possuem certo volume pasta de cimento endurecida e porosa aderida às partículas, a qual possui uma superfície específica elevada, sendo até 20 vezes maior do que uma areia natural (VSI-mag em relação a IPT). Sendo assim, a pasta de cimento fresca e reativa acaba formando mais ligações nos grãos mais porosos (com maior superfície específica), o que aumenta a viscosidade do sistema. Porém, quando o sistema é sujeito a uma alta taxa de cisalhamento, essas ligações são quebradas e a viscosidade diminui.

Desse modo, a perda de trabalhabilidade possível de ser observada na aplicação das argamassas com areia reciclada, não significa que as areias continuam a absorver a água do sistema, mas sim que o sistema torne-se mais estruturado e resistente a movimentação.

Durante a aplicação dessa argamassa, esta é sujeita à baixas taxas de cisalhamento, as quais não são suficientemente fortes para quebrar as ligações entre a pasta de cimento fresca (reativa) e a superfície dos grãos, dificultando assim a movimentação do sistema e, conseqüentemente, sua aplicação. Contudo, essa perda de trabalhabilidade das argamassas recicladas é completamente revertida após a imposição de taxas de cisalhamento mais severas.

Figura 6.23 – Ciclos de cisalhamento das argamassas na avaliação da estabilidade no tempo (C1 = 0 min.; C2 = 30 min.; C3 = 60 min.)

6.4.4 Rodada 3 – incorporação de aditivos

Após a determinação dos teores de água da 2 rodada e da avaliação da estabilidade das argamassas ao longo do tempo foi realizada uma rodada com a incorporação de aditivos⁸ (as concentrações foram as mesmas utilizadas industrialmente):

- Tylose (Metil Hidroxi Etil Celulose – MHEC, Tylose 100012P6): aditivo celulósico retentor de água. A concentração adotada foi de 0,025%, em massa;
- AIA (Lauril Sulfato de Sódio – Texapon ZAD): incorporador de ar. A concentração utilizada foi de 0,0005%, em massa.

Aditivos como os retentores de água e incorporadores de ar são amplamente utilizados no mercado das argamassas. Os primeiros, geralmente são moléculas a base de celulose sendo o hidroxipropilcelulose e o hidrometilcelulose os mais comuns. Quando essas moléculas entram em contato com a água, elas aumentam a viscosidade do meio líquido, diminuindo o atrito entre as partículas facilitando assim o espalhamento das partículas.

Já os incorporadores de ar são tensoativos que geralmente atuam nas superfícies (ou interfaces) entre líquido-líquido ou líquido-ambiente, reduzindo a tensão superficial e facilitando, no caso, a entrada de ar e estabilização de bolhas aprisionadas nos processos de mistura das argamassas. São importantes para aplicação em argamassas, pois a presença das bolhas na suspensão cerâmica torna o sistema mais coeso, o que por sua vez pode aumentar a produtividade e tornar tais materiais cimentícios mais sustentáveis, já que é possível preencher maior volume com menor quantidade do revestimento.

As curvas de mistura das argamassas com aditivos são apresentadas na Figura 6.24. As argamassas comerciais apresentaram comportamentos semelhantes à 2 rodada, com uma energia de mistura ligeiramente mais baixa, mas com um torque final de mistura de cerca de 2 N.m. As argamassas recicladas, contudo, apresentaram comportamentos diferentes. O efeito de aumento da viscosidade da água pelo aditivo celulósico foi bastante marcante nas argamassas com areia reciclada, elevando a dificuldade de mistura e o torque final com um aumento expressivo de 2 para 3 N.m.

⁸ http://www.setylose.de/z_TDS_2011/Englisch/MHS_10012_P6_Bau-en.pdf

Figura 6.24 – Curvas de mistura das argamassas com aditivos (3 rodada)

A proporção volumétrica entre as fases das argamassas, indicada na Figura 6.25, mostra que enquanto o teor de ar incorporado para as argamassas comerciais ficou na faixa de 20%, já para as recicladas esse valor ficou abaixo de 15%.

Figura 6.25 - Distribuição de fases das argamassas com aditivos (3 rodada)

As curvas dos ciclos de cisalhamento, apresentadas na Figura 6.26, indicam comportamentos distintos entre as argamassas comerciais e as recicladas em relação a ação dos aditivos. Enquanto nas argamassas comerciais tanto a viscosidade quanto a tensão de escoamento foram reduzidas devido à presença dos aditivos e consequente maior incorporação de ar (quando comparadas com as composições da rodada 2, (Figura 6.18), as formulações com areias recicladas praticamente não apresentaram diferenças em termos de viscosidade e tensão de escoamento, mesmo com o aumento do teor de ar incorporado (de 9-11 para 15-12% aproximadamente).

Figura 6.26 – Curvas reológicas das argamassas com aditivos (3 rodada)

Os resultados da mesa de consistência (Tabela 6.10) evidenciam mais uma vez a diferença de comportamento das argamassas comerciais e recicladas. As argamassas comerciais mantiveram espalhamentos na faixa de 250 mm, assim como na segunda rodada; já as recicladas apresentam espalhamentos menores do que 250 mm, decaindo para os produtos com menor teor de ar incorporado.

Tabela 6.10 – Espalhamento das argamassas com aditivos na mesa de consistência (3 rodada)

Rodada	Espalhamento (mm)				
	IPT	Cajamar	VSI-NAOmag	VSI-PB	VSI-mag
3	265	277	242	226	217

Desse modo, nota-se que o teor de aditivo celulósico utilizado foi suficiente para causar efeito para todas as argamassas, porém, o incorporador de ar, não foi suficiente para as argamassas recicladas, resultando em teores de ar inferiores. Basicamente, a incorporação de ar depende de 2 fatores: teor de aditivo e disponibilidade de água no sistema.

No caso das areias recicladas, a menor incorporação de ar pode ser causada pela maior área superficial dos agregados que pode consumir mais aditivo ou deixar menos água disponível para o sistema. É importante apontar que o aditivo incorporador de ar não age nos grãos de areia e sim na superfície das partículas finas (cimento, filler ou cal), ancorando e estabilizando as bolhas de ar na pasta.

Entretanto, a elevada área superficial dos agregados reciclados pode ter se associado às moléculas de aditivo presentes nas formulações, impedindo que essas fiquem disponíveis na pasta para a efetiva incorporação de ar. Outra possibilidade é que a associação do uso do aditivo celulósico com os agregados reciclados tenha deixado pouca água disponível para a ação do AIA.

É interessante que sejam realizados experimentos com as formulações com os agregados reciclados utilizando apenas o AIA para uma melhor compreensão de sua atuação em composições com areias recicladas.

6.4.5 Rodada 4 – ajuste do teor de aditivo para as argamassas recicladas

Nesta rodada foi estudado o teor de incorporador de ar adequado para as argamassas recicladas. Os teores de água utilizados foram os mesmos dosados na 2 rodada e o teor de aditivo celulósico (Tylose) foi o mesmo dosado na 3 rodada. O objetivo foi dosar o AIA de modo que as areias recicladas ficassem com um teor de ar incorporado em torno de 20%, em volume.

Em uma primeira aproximação, simplesmente dobrou-se o teor de AIA para a argamassa VSI-NÃOmag, a qual possui a menor porosidade e área específica dentre as recicladas (Figura 6.27). A curva de mistura apresentou um comportamento semelhante aos das argamassas comerciais (3 rodada), assim como o teor de ar incorporado que resultou em 22%, em volume.

A relação entre a massa de AIA adicionada e a área específica do agregado presente na argamassa, para essas 3 argamassas é apresentada na Tabela 6.11. A relação de AIA por m² de agregado para a argamassa VSI-NÃOmag é bem inferior às das comerciais, porém, já foi suficiente para que o teor de ar incorporado ficasse na

faixa dos 20%. Sendo assim, para a dosagem do AIA dos demais agregados reciclados foi utilizada a relação de $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ g/m}^2$.

Figura 6.27 – Curvas de mistura das argamassas naturais e VSI-NÃOmag (comparativo 3 e 4 rodada)

Tabela 6.11 – Dosagem do AIA (primeiro teste)

Amostra	AIA (g)	Área específica do agregado (m^2/g)	AIA dosado (10^{-5} g/m^2)	Teor de ar na argamassa (% vol.)
IPT	0,02	0,28	2,5	19,0
Cajamar	0,02	0,27	2,5	18,3
VSI-NÃOmag	0,04	1,76	0,8	21,9

AIA dosado (10^{-5} g/m^2) = divisão da massa do aditivo pela área específica total do agregado presente na argamassa

As curvas de mistura das argamassas são ilustradas na Figura 6.28 e a proporção volumétrica das fases presentes, no estado fresco, na Figura 6.29. A quantidade de AIA utilizada na argamassa VSI-PB, de acordo com a dosagem utilizada para a VSI-NÃOmag, mostrou-se adequada, incorporando cerca de 20% de ar e proporcionando torques de mistura dentro da faixa de 2 N.m.

Para a argamassa VSI-mag, a dosagem resultou em 0,124 g de AIA, claramente acima do necessário pois incorporou 30% de ar causando torques de mistura muito mais baixos (curva VSI-mag 25% AIA 0,124). Em uma nova tentativa, foi utilizada a mesma quantidade de AIA da argamassa VSI-PB na VSI-mag (curva VSI-mag 25% AIA 0,07). Essa nova dosagem se mostrou adequada, originou uma

curva de mistura no mesmo nível das demais e o teor de ar incorporado ficou na faixa de 20%.

Figura 6.28 – Curvas de mistura das argamassas – 4 rodada

Figura 6.29 - Distribuição de fases das argamassas – 4 rodada

Os dados utilizados na dosagem do AIA para as argamassas e o teor de ar incorporado são sumarizados na Tabela 6.12. Fica evidente a não linearidade da relação entre área específica (BET) e o teor de aditivo necessário (Figura 6.30).

Tabela 6.12 – Dosagem do AIA (segundo teste)

Amostra	Área específica (m^2/g) do agregado da argamassa	AIA dosado ($10^{-5} \text{ g}/\text{m}^2$)	AIA (g)	Teor de ar argamassa (%vol.)
IPT	0,28	2,5	0,02	19,0
Cajamar	0,27	2,5	0,02	18,3
VSI- NÃOmag	1,76	0,8	0,04	21,9
VSI-PB	3,49	0,7	0,07	22,3
VSI-mag	6,66	0,7	0,124	31,3
		0,4	0,07	23,9

Área específica (m^2) = multiplicação da massa do agregado (g) presente na argamassa pelo BET (m^2/g)
 AIA dosado ($10^{-5} \text{ g}/\text{m}^2$) = divisão da massa do aditivo pela área específica total do agregado presente na argamassa

Figura 6.30 – Relação entre teor de aditivo e teor de ar incorporado para as diferentes areias

Os resultados da mesa de consistência (Tabela 6.13) mostram que a nova dosagem do AIA resultou em argamassas com consistências similares às comerciais, com espalhamento na faixa de 250 mm. As curvas dos ciclos de cisalhamento, apresentadas na Figura 6.31, também indicam comportamentos semelhantes entre as argamassas recicladas e as comerciais (Figura 6.26 - 3 rodada): baixa-moderada viscosidade e tensão de escoamento. A argamassa VSI-mag AIA 0,124 possui um

comportamento diferente das demais devido à maior quantidade de ar incorporado (cerca de 30% em volume).

Tabela 6.13 – Espalhamento das argamassas na mesa de consistência – 4 rodada

Rodada	Espalhamento (mm)			
	VSI-NAOmag AIA 0,04	VSI-PB AIA 0,07	VSI-mag AIA 0,124	VSI-mag AIA 0,07
4	258	249	255	257

Figura 6.31 – Curvas reológicas das argamassas – 4 rodada

A Figura 6.32 apresenta os deslocamentos em função da carga aplicada no ensaio de squeeze-flow das argamassas recicladas com o teor de AIA corrigido juntamente com as comerciais da 3 rodada. Com a adição do incorporador de ar, todas argamassas apresentaram uma mudança brusca de comportamento em comparação a 2 rodada (Figura 6.19).

Todas as argamassas resultaram em uma elevada deformação plástica, com deslocamentos acima de 6 mm para velocidade de compressão de 0,1 mm/s e acima de 7,5 mm para velocidade de 3 mm/s para valores baixos de carga, sendo assim argamassas facilmente aplicáveis. A mudança para o estágio de deformação por enrijecimento ocorre para deslocamentos acima 6 e 7 mm, situações nas quais os agregados começam a ser comprimidos pelas placas. Novamente nota-se que a argamassa VSI-mag 25% AIA 0,124 apresenta um comportamento bem distinto das demais, isso se deve ao alto teor de ar incorporado.

Figura 6.32 – Resultados do ensaio squeeze-flow – 3 e 4 rodadas

6.4.6 Conclusões da avaliação no estado fresco das argamassas

Em um cenário no qual a distribuição granulométrica das areias é a mesma para todas as amostras, o consumo de água das argamassas para atingirem uma mesma trabalhabilidade, medida pelo torque de mistura no reômetro, mostrou-se diretamente relacionado aos valores de porosidade e/ou área superficial das areias recicladas. Contudo, apesar das diferentes características entre as areias, todas as argamassas resultam em um mesmo comportamento reológico (ensaios de mesa de consistência, squeeze-flow e ciclos de cisalhamento), uma vez que o teor de água adicionada resulta em um mesmo torque de mistura.

Os estudos de estabilidade das argamassas no tempo demonstraram que a perda de trabalhabilidade possível de ser observada na aplicação das argamassas com areia reciclada não significa que as areias continuam a absorver a água do sistema, mas sim que o sistema torne-se mais estruturado e resistente a movimentação.

Durante a aplicação dessa argamassa, esta é sujeita às baixas taxas de cisalhamento, as quais não são suficientemente fortes para quebrar as ligações entre a pasta de cimento fresca (reativa) e a superfície dos grãos, dificultando assim a

movimentação do sistema e, conseqüentemente, sua aplicação. Contudo, essa perda de trabalhabilidade das argamassas recicladas é completamente revertida após a imposição de taxas de cisalhamento mais severas.

Adicionalmente, eventuais dificuldades de aplicação das argamassas, como um baixo espalhamento, mostraram-se possíveis de serem corrigidos com o aumento do teor de ar incorporado. Para o teor de ar incorporado fixado na faixa dos 20%, em volume, todas as argamassas apresentaram um comportamento semelhante, com uma elevada facilidade de espalhamento.

Com relação ao consumo de aditivos, o retentor de água (Tylose) mostrou-se eficiente com a mesma dosagem para todas argamassas. Já o incorporador de ar (AIA), uma vez que depende da superfície específica do sistema, teve seu consumo elevado nos agregados reciclados. Agregados reciclados possuem maior porosidade e, conseqüentemente, maior área superficial, demandando assim um teor maior de AIA para que incorporem determinado teor de ar, em comparação com agregados comerciais.

No entanto, verificou-se que essa relação entre consumo de AIA e os valores de porosidade/superfície específica não são lineares, sendo necessários mais estudos para sua correta compreensão e elaboração de uma metodologia de dosagem para agregados reciclados.

6.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Foram avaliadas a densidade aparente, módulo de elasticidade e resistência mecânica a tração por compressão uniaxial de todas as argamassas formuladas nas rodadas desta etapa do estudo, sendo:

- 1 rodada: alto teor de água
- 2 rodada: baixo teor de água
- 3 rodada: baixo teor de água e mesmo teor de AIA (diferentes teores de ar incorporado)
- 4 rodada: baixo teor de água e mesmo teor de ar incorporado (diferentes teores de AIA)

6.5.1 Densidade aparente e módulo de elasticidade (E)

Na Figura 6.33 a Figura 6.36 são apresentados os resultados de densidade aparente e módulo de elasticidade para os corpos de prova de cada rodada. Nas rodadas 1 e 2, nota-se que essas propriedades são menores quanto maior o consumo de água e para as rodadas 3 e 4, nas quais foram incorporados volumes de ar diferentes, também nota-se que quanto maior o teor de ar menor as propriedades (densidade e módulo de elasticidade).

Figura 6.33 - Densidade aparente e módulo de elasticidade (28 dias de cura) – 1 rodada

Figura 6.34 - Densidade aparente e módulo de elasticidade (28 dias de cura) – 2 rodada

Figura 6.35 - Densidade aparente e módulo de elasticidade (28 dias de cura) – 3 rodada

Figura 6.36 - Densidade aparente e módulo de elasticidade (28 dias de cura) – 4 rodada

A Figura 6.37 reafirma a tendência mostrada por (CARDOSO, 2009), na qual a porosidade dos corpos de prova no estado endurecido apresenta uma estreita correlação com a soma dos teores de água e ar no estado fresco.

Figura 6.37 – Correlação entre a soma do teor de água e ar no estado fresco com a porosidade dos corpos no estado endurecido

6.5.2 Resistência mecânica

As resistências mecânicas à tração das argamassas da 1 e da 2 rodada apresentaram resultados próximos, apesar de ter sido diferentes teores de água (Figura 6.38). Contudo, o importante nesses resultados é a proximidade do desempenho dos produtos VSI-NÃOmag e VSI-PB em comparação com as areias comerciais. Na 1 rodada, a argamassa VSI-NÃOmag apresentou um desempenho muito próximo às areias IPT e Cajamar enquanto que a VSI-PB teve uma resistência à tração cerca de 15% menor em comparação às argamassas comerciais; já na 2 rodada, tanto a argamassa VSI-NÃOmag quanto a VSI-PB ficaram 9% abaixo da areia IPT e 25% de Cajamar. A argamassa VSI-mag apresentou resistência à tração entre 30% e 50% menores do que as areias comerciais.

Para a 3 rodada (Figura 6.38), na qual foi utilizada um mesmo teor de AIA em todas argamassas, uma vez que as argamassas recicladas incorporaram uma quantidade de ar significativamente menor acabaram resultando em resistências maiores do que as argamassas comerciais. Com a correção do teor de AIA para as

argamassas recicladas (Figura 6.39) as argamassas VSI-NÃOmag e VSI-PB ficaram com resistências 9% menores do que a argamassa IPT e 25% menores do que a Cajamar. A argamassa VSI-mag AIA 0,07, mesmo com o teor de ar incorporado na faixa de 20%, resultou em uma resistência à tração cerca de 60% menor do que as argamassas comerciais.

Figura 6.38 – Resistência à tração por compressão diametral (28 dias de cura) – 1, 2 e 3 rodada

Figura 6.39 - Resistência à tração por compressão diametral (28 dias de cura) – 4 rodada

Analisando-se a resistência à tração das argamassas em relação às suas respectivas porosidades no estado endurecido, nota-se que existe uma grande correlação entre esses parâmetros Figura 6.40. Quanto maior o consumo de água e o teor de ar incorporado no estado fresco, maior será a porosidade da argamassa no estado endurecido e, conseqüentemente, menor sua resistência mecânica.

Figura 6.40 – Relação entre a resistência à tração com a porosidade dos corpos de prova

6.5.3 Conclusões do desempenho mecânico das argamassas no estado endurecido

Na avaliação das propriedades mecânicas do estado endurecido das argamassas, constatou-se que a porosidade final dos corpos de prova (resultantes do consumo de água e teor de ar incorporado no estado fresco) é o parâmetro mais influente no desempenho mecânico, e não apenas a porosidade das partículas.

As argamassas VSI-NãOmag e VSI-PB apresentaram desempenhos bem semelhantes, porém, o aumento no consumo de água e teor de aditivo da VSI-NãOmag, em comparação à Cajamar, é significativamente menor do que a VSI-PB.

6.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A porosidade/área superficial influenciam sobremaneira tanto no consumo de água como o consumo de aditivos, duas variáveis de extrema importância na viabilização econômica e técnica das argamassas com agregados reciclados. Sendo assim, recomenda-se o a utilização da porosidade/área superficial como parâmetro

de controle de qualidade no processo de reciclagem dos RCD para produção de agregados reciclados, e não somente as quantificações do teor de pasta de cimento endurecida.

O consumo de aditivos que agem na superfície dos grãos, como os aditivos incorporadores de ar, aumentam para os agregados reciclados mais porosos, com uma superfície específica mais elevada. Contudo esse aumento não é linear, sendo assim, são necessários mais estudos para a elaboração de uma metodologia de dosagem de aditivos para agregados com porosidades elevadas.

O limite entre as influências da porosidade e a superfície específica, contudo, é de difícil distinção. A avaliação das argamassas ao longo do tempo mostrou que a pasta de cimento fresca e reativa acaba formando mais ligações nos grãos mais porosos (com maior superfície específica), o que aumenta a viscosidade do sistema. Porém, quando o sistema é sujeito a uma alta taxa de cisalhamento, essas ligações são quebradas e a viscosidade diminui.

Desse modo, no processo de aplicação das argamassas recicladas, pode-se ter a impressão de que estas têm sua trabalhabilidade reduzida ao longo do tempo, o que não significa que as areias recicladas continuam a absorver a água do sistema, mas sim que o sistema estará mais estruturado e resistente a movimentação.

7 CONCLUSÕES

O estudo de materiais particulados (inconsolidados) por porosimetria com intrusão de mercúrio deve ser conduzido segundo procedimentos diferentes dos usualmente empregados para materiais sólidos. Dependendo da amplitude da distribuição granulométrica, da morfologia e do tamanho dos poros da amostra, a sobreposição do Hg no espaço entre os grãos e os poros da amostra será mais ou menos influente, mas estará sempre presente como uma limitação da técnica nos casos em que o espaço vazio entre as partículas se sobrepõe ao diâmetro máximo dos poros.

Partículas com diâmetros médios inferiores a 300 µm mostraram um notável aumento da dificuldade de intrusão de Hg no espaço entre as partículas. Para materiais como areias média e grossa, com granulometria na faixa de -4,8+0,30 mm (NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997)), a porosimetria por intrusão de mercúrio apresenta-se como um procedimento menos moroso (em comparação com o ensaio clássico de absorção de água pelo método do cone - ABNT NM 30), com um procedimento experimental simples e com uma influência reduzida de erro humano, uma vez que as condições do equipamento são mecanizadas, além de permitir analisar a distribuição do tamanho dos poros (além da porosidade).

Já para materiais com granulação de areia fina ou inferior (abaixo de 300 µm) (NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997)), o não preenchimento dos vazios entre as partículas pelo mercúrio, indicará a porosidade total do sistema e não das partículas, o que pode levar a resultados completamente distorcidos e conclusões equivocadas, com valores de porosidade muito superiores à porosidade do agregado em si.

Por fim, o estudo mostrou que a porosimetria por intrusão de mercúrio, apesar de amplamente conhecida e utilizada, possui configurações delicadas de ensaio (escolha da pressão de enchimento) que podem levar a resultados distorcidos, principalmente quando em estudos de materiais particulados.

Adicionalmente, a comprovação de uma fração crítica no aumento da influência da pressão de enchimento desta técnica representa um avanço na caracterização de materiais particulados, particularmente para agregados miúdos reciclados, pois evidenciam a necessidade de procedimentos e técnicas adequadas para a análise de suas propriedades.

Caracterização de partículas por análise de imagens dinâmica, mostrou-se uma tecnologia robusta, ágil e estatisticamente representativa (uma vez que são analisadas milhares de partículas em poucos minutos) na quantificação da morfologia de partículas. Dentre os parâmetros de forma estudados, a relação de aspecto mostrou-se o parâmetro mais influente no comportamento reológico de argamassas (formuladas com agregados miúdos entre 1,2 e 0,15 mm), aumentando em até 30% o consumo de água para uma mesma faixa granulométrica (no caso em que a porosidade das partículas é nula). Uma vez que existam diferenças na porosidade das amostras, mudanças na morfologia acabam sendo sobrepostas e a porosidade comanda o consumo de água do sistema.

Tal constatação reafirma que a porosidade, oriunda da pasta de cimento remanescente de construções anteriores, é a propriedade que mais interfere nas características do agregado reciclado, uma vez que implicará também no aumento da área superficial. No entanto, o desenvolvimento recente de sistemas de análise da forma das partículas permitiu identificar outras variáveis que controlam o comportamento reológico de misturas cimentícias quando a porosidade não é um parâmetro diferencial.

A porosidade/superfície específica mostraram-se parâmetros influentes tanto no consumo de água como no consumo de aditivos, duas variáveis de extrema importância na viabilização econômica e técnica das argamassas. Sendo assim, a utilização da porosidade/ superfície específica como parâmetro de controle de qualidade no processo de reciclagem dos RCD mostra-se como uma possibilidade além do teor de pasta de cimento endurecida (estimada pelo teor de $\text{CaO} + \text{PF}$).

Contudo, o limite entre as influências da porosidade e a superfície específica é de difícil distinção. Os estudos de estabilidade das argamassas no tempo demonstraram que a perda de trabalhabilidade possível de ser observada na aplicação das argamassas com areia reciclada não significa que as areias continuam a absorver a água do sistema, mas sim que o sistema torne-se mais estruturado e resistente a movimentação.

Durante a aplicação dessa argamassa, esta é sujeita às baixas taxas de cisalhamento, as quais não são suficientemente fortes para quebrar as ligações entre a pasta de cimento fresca (reativa) e a superfície dos grãos, dificultando assim a movimentação do sistema e, conseqüentemente, sua aplicação. Contudo, essa perda

de trabalhabilidade das argamassas recicladas é completamente revertida após a imposição de taxas de cisalhamento mais severas.

Nesse sentido, em uma tentativa de isolar os efeitos da porosidade e da superfície específica, seria interessante realizar ensaios com argamassas apenas com agregados cerâmicos e apenas com agregados com alto teor de pasta de cimento aderida uma vez que, de uma maneira simplificada, o material cerâmico possui uma porosidade elevada e uma superfície menos rugosa e o cimento possui uma superfície com inúmeras pontas.

A Tabela 7.1 apresenta um comparativo de alguns parâmetros das argamassas em relação à argamassa denominada "Cajamar", com e sem aditivo.

Tabela 7.1 – Proporção na redução dos parâmetros das argamassas formuladas com diferentes areias, tendo-se como referência à areia artificial de Cajamar

Parâmetros	IPT	Cajamar	VSI-NÃOmag	VSI-PB	VSI-mag
Porosidade/sup. específica	1,00	1,00	5,00	11,0	19,0
Consumo de água (2 Rodada)	0,94	1,00	1,05	1,21	1,61
Consumo de AIA (20% de ar incorporado)	1,00	1,00	2,00	3,50	3,50
2 rodada	0,83	1,00	0,75	0,75	0,55
RM (MPa) aditivos (20% de ar incorporado)	0,87	1,00	0,75	0,75	0,37

2 Rodada = rodada na qual foi dosado o teor de água que resultasse em um torque de mistura de 2 N.m, utilizado nas rodadas posteriores.

As argamassas com aditivo incorporador de ar (AIA) que resultou em 20% de ar incorporado foram: IPT AIA 0,02 e Cajamar AIA 0,02 da 3 Rodada; VSI-NÃOmag AIA 0,04, VSI-PB AIA 0,07 e VSI-mag AIA 0,07 da 4 Rodada.

De forma geral, as diferenças de comportamento reológico das argamassas recicladas em comparação com as argamassas com areias comerciais são possíveis de serem corrigidas com o aumento do teor de água e de aditivos. Uma vez que o teor de água adicionada juntamente com o teor de ar incorporado resultam em um mesmo torque de mistura, apesar das diferentes características entre as areias, todas as argamassas resultam em um mesmo comportamento reológico.

Desse modo a porosidade dos agregados influi diretamente nas propriedades mecânicas, pois quanto maior o consumo de água e o teor de ar incorporado, maior será a porosidade no estado endurecido e, conseqüentemente, menor sua resistência à tração.

Sendo assim, o ponto de equilíbrio entre o processamento mineral e o aumento no consumo de água e aditivos está mais ligado ao lado econômico do que do lado técnico. Uma alternativa ao beneficiamento mineral para remoção das fases inorgânicas porosas após a britagem seria a substituição parcial do agregado natural pelo reciclado. Com isso, a porosidade total da mistura dos agregados reciclados e naturais seria reduzida, e aumentaria a utilização de agregados reciclados como materiais de construção, com mínima intervenção no sistema.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT: *NBR-9937: Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo*. 1987.

_____: *NBR 13278: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade e do teor de ar incorporado*. 1995.

_____. *ABNT NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. TÉCNICAS*, A.-A. B. D. N. 1997.

_____: *NBR-NM-30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. 2001.

_____: *NBR-15.116: Agregados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos*., 2004.

_____: *NBR-9935: Agregados - Terminologia*. 2005a.

_____: *NBR 13276:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência*. 2005b.

_____: *NBR-7809: Versão Corrigida - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio*. 2008.

_____: *NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação*. 2012.

AGARWALA, M. K.; PATTERSON, B. R.; CLARCK, P. E. Rheological behavior of powder injection molding model slurries. *Journal of rheology*, v. 36, n. 2, p. 319-334, 1992.

AL-ROUSAN, T.; MASAD, E.; TUTUMLUER, E.; PAN, T. Y. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 5, p. 978-990, 2007.

ALLEN, T. Particle size measurement: Powder sampling and particle size measurement. 5. London: Chapman & Hall, 1997. 525 p.

ALMEIDA, S. L. M.; SILVA, V. S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. In: *II SUFFIB – o uso da fração fina da britagem*, 2005. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: 2005.

ANGULO, S. C. *Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD*. In: *Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, 2002a. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: IBRACON/IPEN, 2002a. p. 293-307.

ANGULO, S. C. *Construction and demolition waste management in Brazil*. *Waste Management World*, p. 54-57, 2003b.

ANGULO, S. C. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento dos concretos*. 2005. 149 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANGULO, S. C.; CHAVES, A. P.; JOHN, V. M.; ALMEIDA, S. L. M.; LIMA, F. M. R. S.; GOMES, P. C. *Análise comparativa da tecnologia de usina na reciclagem da fração mineral dos*

resíduos de construção e demolição. In: *XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME)*, 2005. Natal. **Proceedings**. Natal: 2005. p. 305-312.

ANGULO, S. C.; TEIXEIRA, C. E.; DE CASTRO, A. L.; NOGUEIRA, T. P. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. *Eng Sanit Ambient*, v. 16, n. 3, p. 299-306, 2011.

ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; JOHN, V. M.; KAHN, H.; CINCOTTO, M. A. Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from Sao Paulo, Brazil. *Waste Management*, v. 29, n. 2, p. 721-730, 2009.

ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; LIMA, F. M. R. S.; CHAVES, A. P.; JOHN, V. M. Processamento de resíduos de construção e demolição em usinas de reciclagem européias. In: *Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção*, 2009b. Porto Alegre. **Proceedings**. Porto Alegre: 2009b.

ASTM: C 496/C 496M - 04 $\varepsilon 1$: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2004.

BANFILL, P. The rheology of fresh mortar. *Magazine of Concrete Research*, v. 43, n. 154, p. 13-21, 1991.

BARRA, M.; VAZQUEZ, E. Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates

and their interpretation. In: *Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate*, 1998. London. **Proceedings**. London: 1998. p. 19-30.

BELL, W. K.; VAN BRAKEL, J.; HEERTJES, P. M. Mercury Penetration and Retraction Hysteresis in Closely Packed Spheres. *Powder Technology*, v. 29, n. 1, p. 75-88, 1981.

BETIOLI, A. M. *Influência dos plásticos MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento portland*. 2007. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

BRUMAUD, C.; BESSAIES-BEY, H.; MOHLER, C.; BAUMANN, R.; SCHMITZ, M.; RADLER, M.; ROUSSEL, N. Cellulose ethers and water retention. *Cement and Concrete Research*, v. 53, p. 176-184, 2013.

BSI. *BS:812 - Testing aggregates* 1990.

CACHIM, P. B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 3, p. 1292-1297, 2009.

CARDOSO, F. A. *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*. 2009. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARDOSO, F. A.; CAMPORA, F. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Aplicabilidade de argamassas de revestimento: avaliação empírica e comportamento reológico por squeeze-flow. In: *3 Congresso Português de Argamassas de Construção*, 2010. Lisboa. **Proceedings**. Lisboa: 2010.

CARNEIRO, A.; CASSA, J.; DE BRUM, I.; VIEIRA, A.; COSTA, A.; SAMPAIO, T.; ALBERTE, E. Construction waste characterisation for production of recycled aggregate--Salvador/Brazil. *Waste Management Series*, v. 1, p. 825-835, 2000.

CARRIJO, P. M. *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. 2005. 129 p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. 3. São Paulo: Signus Editora, 1946. 271 p.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. Britagem, peneiramento e moagem. 3. São Paulo: Editora Signus, 2006. 250 p.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 1, p. 125-132, 2003.

CLASEN, C.; KULICKE, W.-M. Determination of viscoelastic and rheo-optical material functions of water-soluble cellulose derivatives. *Progress in Polymer Science*, v. 26, n. 9, p. 1839-1919, 2001.

COELHO, J. M. The minning of aggregates in Metropolitan Region of São Paulo. *Minning, Minerals and Sustainable development (MMSD) report*, n. 121, p. 11, 2001.

COMISSION, E. *Management of construction and demolition waste in the EU - requirements resulting from the Waste Framework Directive and assessment of the situation in the medium term*. http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf. DG ENV G.4 2011.

CONAMA. *Resolução no 307*. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, M. D. C., SECRETARIA NACIONAL DA HABITAÇÃO: Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/02 2002.

D'AGOSTINO, L. Z. *Uso de finos de pedreira no preparo de argamassas de assentamento*. 2004. 126 p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DAMINELLI, B. L. *Estudo de Métodos para Caracterização de Propriedades Físicas de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados*. 2007a. 125 p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DAMINELLI, B. L. *Study of Methods for Characterization of Physical Properties of coarse recycled aggregates from Construction and Demolition Waste*. 2007b. 125 p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, University of Sao Paulo, São Paulo.

DAVISON, J. J. Masonry mortar. *Canadian Building Digest*, Ottawa, Nacional Research Council of Canada, p. 163, 1974.

DE JUAN, M. S.; GUTIERREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 872-877, 2009.

DIAS, J. F.; AGOPYAN, V. *Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo*. 2005. Tese (Boletim Tecnico) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DIN: *Aggregates for mortar and concrete - part 100: recycled aggregates*: DIN-4226-100. Germany, 2002.

DNPM. *Anuário mineral brasileiro* 2012.

DU, L.; FOLLIARD, K. J. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 8, p. 1463-1471, 2005.

ENGMANN, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 132, n. 1-3, p. 1-27, 2005.

FAÇO. *Manual de britagem FAÇO*. PAULISTA, A. M. S. F. D. A. 1994.

FERRARIS, C. F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. *JOURNAL OF RESEARCH-NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY*, v. 104, n. 5, p. 461-478, 1999.

FERRAZ, G. R. *Estações de classificação e transbordo na cidade de São Paulo*. In: *Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, 2001. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: IBRACON/IPEN, 2001. p. 75-86.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing, part II: review of packing of polydisperse particle systems. *Interacem*, v. 41, n. 2, p. 95-97, 1992a.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing, part III: discrete versus continuous particles sizes. *Interacem*, v. 41, n. 5, p. 332-334, 1992b.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing, part IV: computer modelling of particle packing phenomena. *Interacem*, v. 43, n. 3, p. 150-154, 1994a.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Predictive process control of crowded particulate suspensions applied to ceramic manufacturing. London: Kluwer Academic Publishers, 1994b. 786 p.

GAUDIN, A. M. Principles of mineral dressing. New York: MacGraw-Hill, 1932.

GOMEZ-SOBERON, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 8, p. 1301-1311, 2002.

GONÇALVES, P.; DE BRITO, J. Recycled aggregate concrete (RAC)—comparative analysis of existing specifications. *Magazine of Concrete Research*, v. 62, n. 5, p. 339-346, 2010.

GRUBL, P.; RUHL, M. German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb)-Code: Concrete with Recycled Aggregates. In: *SUSTAINABLE CONSTRUCTION: USE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE-PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM HELD AT DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY CONFERENCE CENTRE, LONDON, UK, 11-12 NOVEMBER 1998*, 1998. 1998.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. São Paulo: Pini, 1998.

HANSEN, T. C. The second RILEM state of the art report on recycled aggregates and recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, v. 1, n. 111, p. 201-204, 1986.

HENDRIKS, C. F. The building cycle. Holanda: Aeneas, 2000.

HENDRIKS, C. F. A new vision on the building cycle. Holanda: Aeneas, 2004. 251 p.

ISO. 13322-1 *Particle size analysis - Image analysis methods - Part 1: Static image analysis methods*. STANDARDIZATION, I. O. F.: 39 p. 2004.

_____. 13322-2 *Particle size analysis -- Image analysis methods -- Part 2: Dynamic image analysis methods*. STANDARDIZATION, I. O. F. 2006.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. 2000. 102 p. Tese (Livre docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; SJÖSTRÖM, C. *On agenda 21 for Latin America and Caribbean construbusiness - a perspective from Brazil*. Paper accepted by Building Research and Information 2001.

JOHN, V. M.; ANGULO, S. C.; MIRANDA, L. F. R.; AGOPYAN, V.; VASCONCELLOS, F. Strategies for innovation in construction and demolition waste management in Brazil. In, 2004. 2004.

JONES, M. P. *Applied mineralogy - a quantitative approach*. United States: Graham & Trotman, 1987. 259 p.

KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W. *Summary of concrete workability test methods*. ICAR Report 105.1. Austin: International Center of Aggregates Research 2003.

KROPP, J. ***Bestimmung der Kernfeuchte wassergesättigter: Bauschuttzyklate anhand des Trocknungsverhaltens***: Amtliche Materialprüfungsanstalt Bremen: 12 p. 2005.

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. *Stratigraphy and Sedimentation*. San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1956.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. *Agregados para a construção civil*. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4008 : 34 p. 2009.

LEE, H.; KWON, J. H.; KIM, K. H.; CHO, H. C. Application of DEM model to breakage and liberation behaviour of recycled aggregates from impact-breakage of concrete waste. *Minerals Engineering*, v. 21, n. 11, p. 761-765, 2008.

LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 2001. 270 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEÓN Y LEÓN, C. A. New perspectives in mercury porosimetry. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 76–77, n. 0, p. 341-372, 1998.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, n. 3, p. 107-112, 2009.

LINSS, E.; MUELLER, A. High-performance sonic impulses - an alternative method for processing of concrete. *International Journal of Mineral Processing*, v. 74, p. S199-S208, 2004.

LNEC: *LNEC-E-471*: Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. Portugal, 2006.

LOWELL, S.; SHIELDS, J. E. Powder surface area and porosity. 3. New York: Springer-Verlag, 1991.

LOWELL, S.; SHIELDS, J. E.; THOMAS, M. A.; THOMMES, M. Characterization of porous solids and powders: Surface area, pore size and density. Netherlands: Springer, 2006.

MALKIN, A. Y. Rheology fundamentals. Moscow: ChemTec Publishing, 1994.

MAYER, R. P.; STOWE, R. A. Mercury porosimetry—breakthrough pressure for penetration between packed spheres. *Journal of Colloid Science*, v. 20, n. 8, p. 893-911, 1965.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 1. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MINERALS, M. *Manual de Britagem*. MINERALS, M. 2005.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. *Ambiente Construído*, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MONTE, R.; ALMEIDA, V.; KUDO, E. K.; BARROS, M. M. S. B.; JOHN, V. M. Módulo de elasticidade dinâmico: comparação entre a velocidade da onda ultrassônica e frequência ressonante. In: *VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas 2007*. Recife. **Proceedings**. Recife: 2007.

MUELLER, A.; STARK, U. L. Crushed sand - waste or valuable product. *Aufbereitungs Technik*, p. 30-43, 2005.

NAGATAKI, S.; GOKCE, A.; SAEKI, T.; HISADA, M. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 6, p. 965-971, 2004.

NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F.; VALLE, R.; NEVES, C. Evaluation of investments in recycling centres for construction and demolition wastes in Brazilian municipalities. *Waste Management*, v. 27, p. 1531-1540, 2007.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas - princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico. Fazendo Arte Editorial, 2000.

PARFENOFF, A.; POMEROL, C.; TOURENQ, J. *Les minéraux en grains; méthodes d'étude et détermination*. 6. Paris: Dunod, 1970.

PETERSEN, L.; MINKKINEN, P.; ESBENSEN, K. H. Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 77, n. 1-2, p. 261-277, 2005.

PILEGGI, R. G. *Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários*. 2001. 187 p. Tese (Doutorado) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Carlos, São Carlos.

PINTO, T. P. *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. 1999. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PINTO, T. P.; GONZALEZ, J. L. R. Manejo e gestão de resíduos da construção civil. Brasília: Caixa, 2005. 196 p.

POON, C. S. Management of construction and demolition waste. *Waste Management*, v. 27, n. 2, p. 159-160, 2007a.

POON, C. S. Reducing construction waste. *Waste Management*, v. 27, p. 1715-1716, 2007b.

POON, C. S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources Conservation and Recycling*, v. 50, n. 3, p. 293-305, 2007.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, p. 31-36, 2004.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. Optimization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory. *Construction and Building Materials*, v. 20, n. 10, p. 1069-1078, 2006.

RECOMMENDATION, R. Specification for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, v. 27, p. 557-59, 1994.

ROBINSON, G. R.; MENZIE, W. D.; HYUN, H. Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA. *Resources Conservation and Recycling*, v. 42, n. 3, p. 275-294, 2004.

ROMANO, R. C. O. *Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil*. 2013. 200 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RUSS, J. The image processing handbook. CRC, 2007.

SABBATINI, F. H. *Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente*. 1986. 26 p. Tese (*Boletim Técnico*) - EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SALAGER, J. L. *El mundo de los surfactantes. Cuaderno FIRP S311-A*. Los Angeles 1992.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. 507 p.

SANT'AGOSTINHO, L. M.; KAHN, H. *Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais*. 1997. 29 p. Tese (Boletim técnico) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SHIMA, H.; TATEYASHIKI, H.; MATSUHASHI, R.; YOSHIDA, Y. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 3, n. 1, p. 53-67, 2005.

SMITH, D. M.; STERMER, D. L. Mercury porosimetry: Theoretical and experimental characterization of random microsphere packings. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 111, n. 1, p. 160-168, 1986.

SMITHWICH III, R. W. Contact-angle studies of microscopic mercury droplets on glass. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 123, n. 2, p. 482-485, 1988.

TAM, V. W. Y. Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, n. 7, p. 688-702, 2009.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M.; CHAN, C. H. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 3, p. 364-369, 2008.

TOMAS, J.; SCHREIER, M.; GROGER, T. Liberation and separation of valuables from building material waste. *Rewas'99 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology Volume I-III*, p. 461-470, 1999.

TOMOSAWA, F.; NOGUCHI, T.; TAMURA, M. The way concrete recycling should be. *Journal of Advanced Technology*, v. 3, n. 1, p. 3-16, 2005.

ULSEN, C. *Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição*. 2006. 171 p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ULSEN, C. *Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição*. 2011. 222 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São paulo, São Paulo.

ULSEN, C.; HAWLITSCHKE, G.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Technological Characterization of Fine Fraction from brazilian C&D Waste. In: JOHN, V. M.; VAZQUEZ, E., et al, *2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment*, 2010. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: RILEM Publications SARL, 2010. p. 449-458.

ULSEN, C., HAWLITSCHKE, G., KAHN, H., ANGULO, S.C. AND JOHN, V.M. Technological Characterization of Fine Fraction from C&D Waste. In: *Progress of Recycling in the Built Environment*, 2010. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (no prelo)*, 2010. p. 11.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição (RCD). *Brasil Mineral*, n. 242, p. 154-162, 2005.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. *Waste Management*, n. 0,

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, v. 40, n. 0, p. 1168-1173, 2013.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VAN BRAKEL, J.; MODRÝ, S.; SVATÁ, M. Mercury porosimetry: state of the art. *Powder Technology*, v. 29, n. 1, p. 1-12, 1981.

WBTC: *WBTC-12/2002*: Specifications facilitating the use of recycled aggregates. Hong Kong, 2002.

WEBB, P. A.; ORR, C. *Analytical Methods in Fine Particle Technology*. Norcross: Micromeritics Instrument Corporation, 1997.

WHITAKER, W. *Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil*. 2001. 153 p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

YAGISHITA, F.; SANO, M.; YAMADA, M. Behaviour of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate. In: LAURITZEN, E. K., *RILEM*, 1994. Odense. **Proceedings**. Odense: 1994. p. 331-342.