SÉRGIO CIRELLI ANGULO

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS E A
INFLUÊNCIA DE SUAS CARACTERÍSTICAS NO
COMPORTAMENTO DE CONCRETOS

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

São Paulo
2005

SÉRGIO CIRELLI ANGULO

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS E A
INFLUÊNCIA DE SUAS CARACTERÍSTICAS NO
COMPORTAMENTO DE CONCRETOS

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

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e
Urbana.

Orientador:
Prof. Dr. Vanderley M. John

Co-orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

São Paulo
2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Ângulo, Sérgio Cirelli

Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos / S.C. Angulo. – São Paulo, 2005.

167 p.

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

**1.Resíduos de construção 2.Agregados (Reciclagem)
3.Caracterização tecnológica de minérios 4.Concreto 5.Usinas de reciclagem de resíduos urbanos 6.Controle da qualidade
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.**

Amor Bastante

Paulo Leminski

quando eu vi você
tive uma idéia brilhante
foi como se eu olhasse
de dentro de um diamante
e meu olho ganhasse
mil faces num só instante

basta um instante
e você tem amor bastante

um bom poema
leva anos
cinco jogando bola,
mais cinco estudando sânscrito,
seis carregando pedra,
nove namorando a vizinha,
sete levando porrada,
quatro andando sozinho,
três mudando de cidade,
dez trocando de assunto,
uma eternidade, eu e você,
caminhando junto

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial:
- Meus pais (Ivan e Regina), grandes incentivadores da minha carreira acadêmica.
- Yolanda (*in memoriam*), com todo o meu amor, pela experiência transmitida e acompanhamento nos meus primeiros anos de estudo.

AGRADECIMENTOS

Realizado por uma equipe, este trabalho em alguns momentos ultrapassou nossos limites individuais, superando até necessidades pessoais. Valeu! No seu desenvolvimento, permitiu também um maduro relacionamento profissional e laços fortes de respeito e amizade. Essa é a minha alegria!

Prof. Dr. VANDERLEY M. JOHN, muito obrigado pela orientação e amizade. Palavras são insuficientes para expressar meu respeito e admiração profissional por você. A sua ajuda profissional foi e é imprescindível na minha carreira.

Prof. Dr. HENRIQUE KAHN, agradeço sua colaboração e amizade. Obrigado por todos os ensinamentos, de mineralogia a técnicas analíticas de caracterização. Respeito seu trabalho e admiro sua luta. A Engenharia de Minas ganha um fiel seguidor (eu), graças a você. Ah, não desisti da análise de imagem!

Mestranda Eng. CARINA ULSEN, agradeço sua sinceridade, seriedade e profissionalismo. O nosso programa experimental tem muito do seu perfeccionismo! Foi um prazer tê-la na equipe e tenho certeza que continuará sendo. Acompanho e torço pelo seu sucesso como pesquisadora. Ah!, e chega de quebrar o pé.

M. Eng. PRISCILA M. CARRIJO, obrigado por não me abandonar no meio de todos os problemas experimentais que tivemos e por ter suportado essas dificuldades até acima dos seus limites. Eu descobri em você uma amiga e uma pesquisadora inteligente e incansável. Suas intuições experimentais foram de vital importância para a saúde dos nossos concretos (a história da pá, se é que você me entende).

Prof. Dr. ANTONIO DOMINGUES, foi muito prazeroso dosarmos e analisarmos os nossos concretos. Admiro sua percepção e capacidade científica assim como prezo muito sua amizade.

Prof. Dr. MARIA ALBA CINCOTTO, devo-lhe muito do conhecimento adquirido em química de materiais de construção civil e técnicas analíticas. Agradeço a honra de trabalhar com você.

Prof. Dr. ARTHUR PINTO CHAVES, obrigado pelo apoio na realização do programa experimental e por suas valiosas contribuições a esta tese.

Agradeço à FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS, através do Fundo Verde e Amarelo, e FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO pelo financiamento desta pesquisa. Ao CONSELHO NACIONAL DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (CNPq) pela concessão da minha bolsa de doutorado e das bolsas de iniciação científica.

Agradecimento à ENGRÁCIA BARTUCIOTTI na organização e controle financeiro impecável durante a execução dos projetos de pesquisa. Admiro muito seu profissionalismo.

Agradeço à ILDA, ALFREDO, ANTÔNIO ANGELONI (TICO), JUSCELINO pelo dedicado auxílio nos laboratórios LTM e LCT da Engenharia de Minas.

Aos alunos de Iniciação Científica da Escola Politécnica da USP, PAULA CIMINELLI RAMALHO e RAQUEL MASSAMI SILVA, ao estagiário HILTON MARIANO, e a Eng. IVIE PIETRA, obrigado pela ajuda inestimável no desenvolvimento e realização desta pesquisa.

Ao ISMAEL CAMPAROTTO, MÁRIO TAKEASHI, REGINALDO SILVA, ADILSON SANTOS, RENTA MONTE e JOÃO SOARES, agradecimentos pelo auxílio nos laboratórios de Microestrutura e no CPqDcc da Engenharia Civil.

Agradeço à Prefeitura de São Paulo (Sr. DAN MOCHE SCHNEIDER, HILDO, NILSON e demais funcionários da usina de reciclagem de Itaquera), à empresa NORTEC (Sr. ARTUR GRANATO e demais funcionários), à Prefeitura de Vinhedo (Sr. GERALDO FREITAS, HENRIQUE e demais funcionários) pela ajuda na coleta das amostras.

Aos professores Alexandre Kawano, Paulo Monteiro, Paulo Helene, Wellington Repette sinceros agradecimentos pelos conhecimentos transmitidos no curso de pós-graduação.

À Fátima Regina G. Sanches Domingues, Paulo Heitzmann, Maria de Fátima da Silva Paiva, Leonor Madalena Machado Rosa Andrade e Vilma da secretaria e biblioteca da Engenharia Civil meu muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Enric Ramonich Vazquez agradeço pelo empenho e colaboração no pedido da bolsa “sanduíche” que infelizmente não se efetivou.

EM ESPECIAL:

AOS MEUS VERDADEIROS AMIGOS.....
VOCÊS SÃO PESSOAS FUNDAMENTAIS PARA MIM.....

RESUMO

Entre os desafios para a expansão de mercado da reciclagem, encontra-se o de viabilizar o emprego dos agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) reciclados em concretos. No entanto as normas que regulamentam tal emprego não são facilmente aplicáveis nas usinas de reciclagem, existindo pouca informação sistemática de como as diferentes características dos agregados de RCD reciclados influenciam no desempenho do concreto.

O objetivo desta tese é identificar as características dos agregados de RCD reciclados que exerçam influência relevante no comportamento mecânico dos concretos. As seguintes etapas experimentais são desenvolvidas: a) caracterização química e mineralógica das frações granulométricas de três amostras representativas de agregados, b) caracterização das propriedades físicas de agregados graúdos separados por densidade, assim como da composição química, mineralógica e por fases, c) influência das características dos agregados graúdos separados por densidade no comportamento mecânico dos concretos.

Na caracterização dos agregados foram utilizados os seguintes métodos: análise granulométrica, análise química por FRX, análise mineralógica por DRX, determinação da fração solúvel por ataque com solução de HCl 33%, e análise termogravimétrica, separação por densidade empregando líquidos densos e equipamento “Sink and Float”, catação das fases, determinação da massa específica aparente e absorção de água dos agregados, dosagem e avaliação do comportamento mecânico de concretos produzidos com esses agregados.

Os resultados permitem concluir que a porosidade (ou massa específica aparente) dos agregados de RCD reciclados controla o comportamento mecânico dos concretos produzidos com relação água e cimento constante, assim como a soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha – frações mais porosas. A separação por densidade é uma técnica eficiente para separar esses agregados em subgrupos de diferentes porosidades, gerando concretos com comportamento mecânico e absorção de água similares. O estudo realizado aponta para uma densidade de corte em torno de 2,2 a 2,3 g/cm³. Os agregados contidos no intervalo “d > 2,2” possuem teores elevados de rochas e teores baixos de cerâmica vermelha, resultando em concretos com comportamento mecânico semelhante ao dos agregados naturais analisados. A avaliação da distribuição de densidade pode ser um método simples e rápido para a classificação de lotes desses agregados e controle do comportamento mecânico dos concretos produzidos. Na fração graúda e miúda, os teores de rochas e cerâmicas são superiores a 50% da massa, e o comportamento dos principais óxidos da composição química é semelhante. Esse comportamento muda significativamente na fração fina, em que predominam os aglomerantes e argilominerais (teores superiores a 77%). A origem (Itaquera e Vinhedo) e a cominuição influenciaram, de forma representativa, a distribuição de massa dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade. O agregado de Itaquera apresentou mais de 70% da massa no intervalo de densidade superior a 2,2 g/cm³.

ABSTRACT

Construction and demolition waste (CDW) recycled aggregates are not largely used in concrete due to CDW composition heterogeneity and CDW recycled aggregate physical property variability from visual classification and hand sorting of proposed standards that provide insufficient relation between the aggregate characteristics and concrete performance.

This thesis aims to identify CDW recycled aggregate characteristics that influence the concrete mechanical performance. The experimental design was divided in three stages: a) detailed chemical and mineralogical characterization of three representative CDW recycled aggregate samples, b) characterization of the physical properties of the coarse CDW recycled aggregates separated by heavy media as well as the composition in terms of chemical, mineralogical, and visual phases, and c) the influence of the coarse CDW recycled aggregate separated by heavy media on concrete mechanical performance.

The following methods were used: particle size distribution, chemical analysis by XRF, mineralogical analysis by XRD, soluble fraction in chloride acid leaching assay, thermal analysis, sequential heavy media and gravity separation, hand sorting, bulk specific gravity and water absorption, concrete mix design and its compressive strength and elastic modulus using the CDW recycled aggregates.

In conclusion, CDW recycled aggregate porosity controls concrete mechanical performance formulated with constant cement and water relation. The concrete mechanical performance is related to bulk specific gravity of CDW recycled aggregates separated by density, including to the sum of binder and red ceramic content. Heavy media and gravity separation is efficient to separate CDW recycled aggregates in bulk specific gravity groups, producing concrete with similar concrete mechanical behavior and water absorption. Cutting density in 2.2-2.3 g/cm³ seems to be efficient since the aggregates with the upper density have high rock content resulting concrete mechanical performance similar to that produced using natural aggregates. Mass distribution in density separation could be a simple and fast method to classify CDW recycled aggregate and to control concrete mechanical performance. The coarse and sand fraction of CDW recycled aggregates had more than 50% in mass of rocks and ceramics, with quite similar main oxide contents in chemical composition. However, the contents changed in fine fraction (lower than 0.15 mm) whose binder content and clay minerals are in majority (upper to 77% in mass). The origin of CDW recycled aggregate and comminution influenced in mass distribution of sequential density separation. In Itaquera (São Paulo), the mass distribution upper to 2,2 g/cm³ was around 70%.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

1	INTRODUÇÃO	1
2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – DEFINIÇÃO, IMPACTO E GERENCIAMENTO	6
2.1	DEFINIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	6
2.2	IMPACTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NAS CIDADES	7
2.3	ESTRATÉGIAS PARA O GERENCIAMENTO ADEQUADO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	9
2.3.1	<i>Evitar deposições ilegais.....</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>Segregar os tipos de materiais do RCD na fonte.....</i>	<i>11</i>
2.3.3	<i>Estimular a reciclagem</i>	<i>15</i>
2.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	20
3	RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DO RCD COMO AGREGADO E O EMPREGO EM CONCRETOS.....	22
3.1	RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DO RCD COMO AGREGADO	22
3.1.1	<i>Cominuição</i>	<i>24</i>
3.1.2	<i>Separação por tamanho</i>	<i>25</i>
3.1.3	<i>Concentração</i>	<i>26</i>
3.1.4	<i>Operações auxiliares.....</i>	<i>33</i>
3.1.5	<i>Fluxogramas típicos das usinas de reciclagem.....</i>	<i>33</i>
3.1.6	<i>Controle de qualidade</i>	<i>36</i>
3.2	USO DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS EM CONCRETOS.....	37
3.2.1	<i>Recomendações</i>	<i>37</i>
3.2.2	<i>Normas técnicas</i>	<i>39</i>
3.2.3	<i>Dificuldades na aplicação das normas técnicas em usinas de reciclagem</i>	<i>42</i>
3.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	46
4	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS	47
4.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1.1	<i>Coleta de amostras representativas.....</i>	<i>47</i>
4.1.2	<i>Análise granulométrica dos agregados e britagem</i>	<i>50</i>
4.1.3	<i>Preparação das amostras para análises químicas e mineralógicas..</i>	<i>51</i>
4.1.4	<i>Análise química por FRX</i>	<i>52</i>
4.1.5	<i>Seleção das frações granulométricas para as demais análises</i>	<i>53</i>
4.1.6	<i>Análise mineralógica por DRX</i>	<i>54</i>
4.1.7	<i>Termogravimetria - antes e após o ataque com HCl 33%.....</i>	<i>54</i>
4.1.8	<i>Estimativa dos teores de aglomerantes.....</i>	<i>54</i>
4.1.9	<i>Estimativa dos teores de argilominerais</i>	<i>55</i>
4.1.10	<i>Análise estatística.....</i>	<i>56</i>

4.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	56
4.3	RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA POR FRX	58
4.3.1	<i>Itaquera vermelho</i>	58
4.3.2	<i>Itaquera cinza</i>	60
4.3.3	<i>Vinhedo vermelho</i>	62
4.3.4	<i>Influência da origem, classificação e granulometria dos agregados de RCD reciclados</i>	64
4.3.5	<i>Interpretação dos resultados</i>	66
4.4	ANÁLISE MINERALÓGICA POR DRX	70
4.5	TERMOGRAVIMETRIA – ANTES E APÓS O ATAQUE COM HCL 33%	72
4.6	ESTIMATIVA DOS TEORES DE AGLOMERANTES E DE ARGILOMINERAIS.....	79
4.7	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	80
5	SEPARAÇÃO DENSITÁRIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECIKLADOS	83
5.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	84
5.1.1	<i>Preparação das frações granulométricas</i>	85
5.1.2	<i>Separação por líquidos densos</i>	85
5.1.3	<i>Catação nos produtos separados por densidade</i>	87
5.1.4	<i>Determinação da massa específica e absorção de água</i>	88
5.1.5	<i>Análise química por FRX</i>	90
5.1.6	<i>Seleção de produtos separados por densidade para as demais análises</i> 91	
5.1.7	<i>Análises mineralógicas</i>	91
5.1.8	<i>Estimativa dos teores de aglomerantes, de argilominerais e de rochas naturais</i> 91	
5.1.9	<i>Análise estatística</i>	92
5.2	Distribuição de massa nos intervalos de densidade	92
5.3	Distribuição de fases e as propriedades físicas nos intervalos de densidade 94	
5.4	Análise química por FRX.....	104
5.5	Análise mineralógica por DRX.....	109
5.6	Estimativa dos aglomerantes, dos argilominerais e das rochas.....	112
5.7	Conclusões do capítulo	115
6	INFLUÊNCIA DA POROSIDADE DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RCD RECIKLADOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO 118	
6.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	119
6.1.1	<i>Coleta das amostras dos agregados graúdos de RCD reciclados...</i> 119	
6.1.2	<i>Separação dos agregados graúdos de RCD reciclados por densidade</i> 120	
6.1.3	<i>Outros materiais para a produção dos concretos</i>	123
6.1.4	<i>Caracterização dos materiais</i>	124
6.1.5	<i>Dosagem dos concretos</i>	126
6.1.6	<i>Propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido</i> 129	
6.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	129

6.2.1	<i>Distribuição granulométrica dos agregados</i>	<i>129</i>
6.2.2	<i>Caracterização dos agregados graúdos de RCD reciclados.....</i>	<i>130</i>
6.3	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO.....	134
6.4	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	138
6.4.1	<i>Porosidade e absorção de água</i>	<i>138</i>
6.4.2	<i>Resistência à compressão.....</i>	<i>142</i>
6.4.3	<i>Módulo de elasticidade</i>	<i>146</i>
6.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	150
7	CONCLUSÕES	152
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
	Apêndice A	
	Apêndice B	
	Apêndice C	
	Apêndice D	
	Apêndice E	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Descrição de alguns equipamentos industriais utilizados nas operações unitárias (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997 adaptado; KELLY; SPOTTISWOOD, 1982).	23
Tabela 3.2 Operações unitárias empregadas nas usinas fixas nacionais de reciclagem da fração mineral do RCD como agregado.	23
Tabela 3.3 Recomendações para uso de agregados graúdos de RCD reciclados em concretos (ANGULO; JOHN, 2002b; ANGULO; JOHN, 2004).	38
Tabela 3.4 Requisitos de algumas normas técnicas para uso dos agregados de RCD reciclados em concretos (HENDRIKS, 2000; DIN, 2002; MULLER, 2004; ABNT, 2004).	40
Tabela 3.5 Variabilidade na composição de fases e nas propriedades físicas dos agregados de RCD reciclados obtidos a partir dos resíduos de alvenaria (dados de Muller, 2003).	43
Tabela 4.1 Frações granulométricas TQ e B de IT C, IT V e VI V selecionadas.	53
Tabela 4.2 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas TQ do agregado de RCD reciclado de IT V.	59
Tabela 4.3 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas B do agregado de RCD reciclado de IT V.	59
Tabela 4.4 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas TQ do agregado de RCD reciclado de IT C.	61
Tabela 4.5 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo na análise química das frações granulométricas B do agregado de RCD reciclado de IT C.	61
Tabela 4.6 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo na análise química das frações granulométricas TQ do agregado de RCD reciclado de VI V.	63
Tabela 4.7 Teores (% em massa) dos óxidos das análises químicas das frações granulométricas B do agregado de RCD reciclado de VI V.	63
Tabela 4.8 Eventos térmicos, picos característicos de temperaturas e suas relações com os aglomerantes e os argilominerais.	77
Tabela 4.9 Perda de massa da análise termogravimétrica, em algumas faixas de temperaturas pré-definidas, para quantificação da parcela percentual hidratada e carbonatada do aglomerante, e o teor de calcita.	78
Tabela 4.10 Estimativa dos grupos de materiais presentes nas frações granulométricas selecionadas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.	79
Tabela 5.1 Massas das frações granulométricas compostas dos agregados graúdos de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V encaminhadas para as separações minerais.	85
Tabela 5.2 Frações granulométricas separadas por intervalos de densidade, selecionadas para os demais ensaios de caracterização.	91

Tabela 5.3 Diferenças percentuais de massa nas frações granulométricas dos agregados graúdos de RCD reciclados após a separação por densidade.....	92
Tabela 5.4 Valores de massa específica aparente e absorção de água da cerâmica vermelha nas frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.....	98
Tabela 5.5 Valores de massa específica aparente e absorção de água da fase rocha nas frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.....	98
Tabela 5.6 Valores de massa específica aparente e absorção de água da fase “cimentícia” nas frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.....	99
Tabela 5.7 Valores de massa específica aparente e absorção de água nas frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.	101
Tabela 5.8 Valores de massa específica real (kg/dm ³) das frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.....	104
Tabela 5.9 Teores dos óxidos dos produtos separados no intervalo “1,7<d<2,2”. ..	105
Tabela 5.10 Teores dos óxidos dos produtos separados no intervalo “d> 2,2”.	106
Tabela 5.11 Estimativa dos teores (% em massa) dos aglomerantes, dos argilominerais e das rochas nos produtos selecionados nos intervalos de densidade.....	112
Tabela 6.1 Traços dos concretos com os agregados graúdos separados densitariamente pelo “Sink and Float” para diferentes consumo de cimento..	128
Tabela 6.2 Resultados de massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”.....	131
Tabela 6.3 Teores dos aglomerantes, dos argilominerais, da “cerâmica vermelha” e da “rocha” nos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade pelo “Sink and Float”.	133
Tabela 6.4 Abatimentos, consumos de aditivo, teores de ar aprisionado e massas específicas dos concretos, no estado fresco, para os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, e a brita natural.....	135
Tabela 6.5 Porosidade média e massa específica média da amostra seca dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, e a brita natural.	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Abordagem metodológica da primeira etapa experimental desta tese.....	3
Figura 1.2 Abordagem metodológica da segunda etapa experimental desta tese.	4
Figura 1.3 Abordagem metodológica da terceira etapa experimental desta tese.	4
Figura 2.1 Deposição ilegal na cidade de São Paulo. (a) rua utilizada como depósito clandestino limpa pela prefeitura em 30/08/2002. (b) a mesma rua após 2 meses. Fonte: Vanderley M. John.	8
Figura 2.2 Classificação da madeira presentes no RCD (classe B) em uma estação de transbordo na cidade de São Paulo. Fonte: Tarcísio de Paula Pinto.	12
Figura 2.3 Coleta seletiva em canteiros de obras realizada na cidade de São Paulo (Fonte: Francisco Antunes de Vasconcellos Neto).	13
Figura 2.4 RCD mineral misto pela ausência de procedimentos de coleta seletiva (foto do autor).....	14
Figura 2.5 Reaproveitamento de materiais de construção em demolições na cidade de Londrina (foto do autor).	15
Figura 2.6 Imagens dos aterros de RCD mineral em (a) Itatinga e (b) Itaquera	17
Figura 2.7 Geração nacional estimada de RCD mineral e mercados potenciais para a reciclagem.	18
Figura 3.1 Desenho esquemático sobre o funcionamento dos classificadores mecânicos utilizados na reciclagem da fração mineral do RCD (HENDRIKS, 2000).....	26
Figura 3.2 Controle visual do RCD, através de câmera digital, para classificação do RCD em mineral e não-mineral.	27
Figura 3.3 RCD mineral cinza (a) e vermelho (b) classificado na usina de reciclagem de São Paulo (Itaquera)/Brasil.....	28
Figura 3.4 Catação da fração não-mineral do RCD na usina de reciclagem de São Paulo (Itaquera), antes (a) e após (b) a cominuição.	29
Figura 3.5 Teor (% kg/kg) da fração não-mineral presente nos agregados graúdos de RCD reciclados da usina de reciclagem de Santo André, Estado de São Paulo, Brasil.	29
Figura 3.6 Separação mecânica da fração não-mineral do RCD na alimentação de usinas de reciclagem da Holanda (HENDRIKS, 2000; KOWALCZYK <i>et al.</i> , 2002; THOLE, 2002).	30
Figura 3.7 Separação magnética dos metais ferrosos na usina de São Paulo (Itaquera) (a) e estoque da fração metálica ferrosa separada magneticamente na usina de Salzburg/Áustria (b).	30
Figura 3.8 Separador de tambor de corrente induzida, em escala piloto, disponível no RWTH - Universidade de Aachen/Alemanha.	31
Figura 3.9 Fração não mineral (lignita, isopor, madeira) separada dos agregados de RCD reciclados pelo jig (a) e detalhe de compósito de cimento e madeira para isolamento térmico comumente presente no RCD (b) em Salzburg/Áustria.	32
Figura 3.10 Fluxograma da usina de reciclagem da fração mineral do RCD de Vinhedo, Estado de São Paulo, Brasil.....	34
Figura 3.11 Fluxograma de uma usina de reciclagem da fração mineral do RCD na Alemanha (MULLER, 2003 adaptado).	35

Figura 3.12 Fluxograma do processamento dos agregados de RCD reciclados a úmido empregando jigge (JUNGMANN, 1997; JUNGMANN; QUINDT, 1999).....	36
Figura 3.13 Correlação entre as propriedades massa específica aparente e absorção de água para as fases dos agregados grãos de RCD reciclados obtidos na usina de reciclagem de Santo André – São Paulo (dados de ANGULO, 2000). 42	
Figura 3.14 Variabilidade dos agregados grãos de RCD misto reciclados em função de caçambas processadas. Ponto: dentro de uma mesma caçamba e Linha – entre as caçambas. (a) fases da composição (catação), (b) absorção de água e (c) massa específica aparente (ANGULO <i>et al.</i> , 2003c; JOHN; ANGULO, 2003).....	44
Figura 3.15 Variabilidade da absorção de água, frequência relativa, das fases identificadas a partir do método de catação: a) cimentícias, b) cerâmica vermelha e c) rochas em agregados grãos de RCD reciclados nacionais (ANGULO <i>et al.</i> , 2003c; JOHN; ANGULO, 2003).	45
Figura 4.1 Procedimento de formação da pilha alongada.	48
Figura 4.2 Recorte e redistribuição das extremidades da pilha alongada (a) e retirada das alíquotas (b).	49
Figura 4.3 Pilha alongada do VV (a). A alíquota foi retirada dentre os pontos marcados pelos separadores (b).....	49
Figura 4.4 Formação das frações granulométricas TQ e B.	50
Figura 4.5 Peneiramento a úmido: (a) fundo adaptado e (b) recuperação da água no balde para recirculação.	51
Figura 4.6 Britador de rolos, marca Eberle, modelo S90L4.	52
Figura 4.7 Moinho de discos oscilantes, Herzog HSM 250P.....	52
Figura 4.8 Distribuições passantes acumuladas dos agregados de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V.	57
Figura 4.9 Distribuições passantes acumuladas dos agregados grãos TQ e B de IT V (a), IT C (b) e VI V (c) após a britagem e especificação de produto brita 1 da ABNT.	58
Figura 4.10 Teores dos óxidos SiO_2 (a), Al_2O_3 (b), CaO (c) e perda ao fogo (d) na análise química das frações granulométricas TQ e B do agregado de RCD reciclado de IT V.	60
Figura 4.11 Teores dos óxidos SiO_2 (a), Al_2O_3 (b), CaO (c) e perda ao fogo (d) na análise química das frações granulométricas TQ e B do agregado de RCD reciclado de IT C.	62
Figura 4.12 Teores dos óxidos SiO_2 (a), Al_2O_3 (b), CaO (c) e perda ao fogo (d) na análise química das frações granulométricas TQ e B do agregado de RCD reciclado de VI V.	64
Figura 4.13 Teores ponderados de SiO_2 (a), Al_2O_3 (b), CaO (c) e perda ao fogo nas frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.	66
Figura 4.14 Correlação entre os teores de perda ao fogo e os teores de CaO (a), e entre os teores de perda ao fogo e a soma dos teores de CaO e Al_2O_3 (b) para as frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.	68
Figura 4.15 Correlação entre a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e a soma dos teores de CaO e de perda ao fogo (a) e entre a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e	

Fe ₂ O ₃ e os teores de CaO (b) para as frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.	69
Figura 4.16 Correlação entre os teores de SiO ₂ e CaO para as frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de ITC, IT V e VI V.	70
Figura 4.17 Difrátogramas das frações granulométricas selecionadas dos agregados de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V com identificação das fases minerais ou cristalinas. Legenda: Mu- muscovita; Fl – flogopita; Il – ilita; E – etringita; Me – merlionita; Ca- caulinita; Si – sílica; Mi – microclínio; Al –albita; C – calcita; Gi- gismondina.	71
Figura 4.18 Derivadas da curvas de perda de massa das frações granulométricas graúdas selecionadas, antes e após o ataque com HCl.	74
Figura 4.19 Derivadas da curvas de perda de massa das frações granulométricas miúdas selecionadas, antes e após o ataque com HCl.	75
Figura 4.20 Derivadas das curvas de perda de massa das frações granulométricas finas, antes e após o ataque com HCl.	76
Figura 5.1 Seqüência adotada para a separação por líquidos densos.	86
Figura 5.2 Desenho esquemático que ilustra separação por líquidos densos.	87
Figura 5.3 Determinação da absorção de água e massa específica dos agregados graúdos de RCD reciclados: (a) saturação por 24h e (b) determinação da massa submersa através da balança hidrostática.	89
Figura 5.4 Picnômetro a gás hélio, marca Quantachrome, modelo MUP-SOC.	90
Figura 5.5 Distribuição de massa nos diversos intervalos de densidade para as frações granulométricas dos agregados graúdos de RCD reciclados: a) IT V, b) IT C e c) VI V.	93
Figura 5.6 Distribuição de massa ponderada nos diversos intervalos de densidade para os agregados graúdos de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V.	94
Figura 5.7 Teores médios das fases dos agregados graúdos de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V nos intervalos de densidade “d > 1,7”. Legenda: R- rochas; CI – cimentícia; CV – cerâmica vermelha; CB – cerâmica branca; CA- cimento amianto; B- betume; e O-outros.	95
Figura 5.8 Teores médios das diversas fases nos produtos das separações por densidade de IT C, IT V e VI V em função da mediana do intervalo de densidade.	97
Figura 5.9 Distribuição dos valores (mínimos-médias-máximos) de massa específica aparente das fases separadas por densidade. Em verde: valores de densidade no intervalo.	100
Figura 5.10 Distribuição dos valores (mínimos-médias-máximos) de massa específica aparente nas frações granulométricas separadas por densidade. Em verde: valores de densidade no intervalo.	101
Figura 5.11 Correlação linear positiva entre os valores médios de massa específica aparente das fases (a) e dos produtos, média ponderada das fases, (b) separados por densidade e as medianas dos intervalos de densidade.	102
Figura 5.12 Correlação exponencial entre os valores de massa específica aparente e de absorção de água das fases (a) e dos produtos (b) separados por densidade.	103
Figura 5.13 Correlação linear inversa (linha contínua) entre a soma dos teores de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ e a soma dos teores de CaO e da perda ao fogo (a) e entre a	

soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e a o teor de CaO (b) para os produtos separados por densidade.	107
Figura 5.14 Comparação entre os teores dos óxidos nos produtos separados por densidade: a) soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , b) teores de CaO, c) soma dos teores de CaO e perda ao fogo e d) perda ao fogo.	108
Figura 5.15 Difrátogramas dos produtos selecionados no intervalo de densidade “ $1,7 < d < 2,2$ ”, selecionados. Legenda: Mn- montmorilonita; Il – ilita; Me – merlionita; Mu- muscovita; Il- ilita; H – hidrocalumita; CSH – silicato de cálcio hidratado; B - bassanita; D –dolomita; C- calcita; Si – sílica; Q –quartzo; Mi – microclínio; O – ortoclásio; An – antigorita.	110
Figura 5.16 Difrátogramas dos produtos selecionados no intervalo de densidade “ $d > 2,2$ ”. Legenda: F-flogopita; Me – merlionita; Mu -muscovita; H – hidrocalumita; R – rosenhaita; CSH – silicato de cálcio hidratado; S –scawtita; C- calcita; Si – sílica; Mi – microclínio; O- ortoclásio; Al- albita; An – antigorita.....	111
Figura 5.17 Correlação linear positiva entre o teor de argilominerais e os teores da fase cerâmica vermelha nas frações granulométricas selecionadas nos intervalos de densidade.	113
Figura 5.18 Correlações entre os teores de aglomerantes (a), de argilominerais (b) e de rochas (c) e as medianas do intervalo de densidade nos produtos das separações por densidade de IT C, IT V e VI V.	114
Figura 5.19 Correlação entre a soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha e os valores de massa específica aparente das frações selecionadas separadas por densidade.	115
Figura 6.1 Equipamento “Sink and Float”, marca Denver (a) e o ferro silício em pó (b).	121
Figura 6.2 Desenho esquemático sobre o funcionamento do equipamento “Sink and Float”.	121
Figura 6.3 Fluxograma da separação densitária seqüencial dos agregados graúdos de RCD reciclados empregando o equipamento “Sink and Float”.	123
Figura 6.4 Pilha alongada com agregado graúdo de RCD reciclado separado por densidade (a) e retirada de alíquota de 10 kg (b).	123
Figura 6.5 Fluxograma operacional para a determinação dos teores de aglomerantes, de argilominerais, de cerâmica vermelha e de rocha nos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”.	125
Figura 6.6 Distribuições retidas acumuladas dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”, e da brita com os limites estabelecidos para a Brita 1 da ABNT.	130
Figura 6.7 Distribuição retida acumulada da areia de rio lavada com os limites da zona 4 estabelecidos pela NBR 7211.	130
Figura 6.8 Correlações lineares entre as medianas do intervalo de densidade e os valores de massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente por dois diferentes métodos.	132
Figura 6.9 Absorção de água em função do tempo para os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade pelo “Sink and Float”.	133
Figura 6.10 Comparação dos teores de aglomerantes (a), de cerâmica vermelha (b), de rocha (c) e de argilominerais (d) nas duas amostras de agregados graúdos de	

RCD reciclados em função da mediana do intervalo de densidade por dois métodos de separação distintos.	134
Figura 6.11 Medidas de abatimento dos concretos em função da massa específica do concreto fresco (a) e da massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade (b).	136
Figura 6.12 Massa específica do concreto fresco em função da massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade.	136
Figura 6.13 Consumo médio de aditivo nos concretos em função da massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”.	137
Figura 6.14 Teor de ar aprisionado nos concretos em função do intervalo de densidade dos agregados e da relação a/c.	137
Figura 6.15 Correlação entre a porosidade média do experimento e teórica nos concretos produzidos com agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade e diferentes consumo de cimento ou relações a/c.	139
Figura 6.16 Correlação linear positiva entre a porosidade dos agregados graúdos separados por densidade e a dos concretos.	140
Figura 6.17 Absorção de água dos concretos em função dos valores de massa específica aparente (a) e da soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha (b) dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, para diferentes relações a/c ou consumos de cimento.	140
Figura 6.18 Absorção média dos concretos em função da relação a/c (a) e em função dos agregados graúdos separados por densidade, e natural (b).	141
Figura 6.19 Resistência média à compressão e a porosidade dos concretos com diferentes agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade e relações a/c.	142
Figura 6.20 Correlações lineares entre os resultados de resistência média normalizada à compressão e a porosidade: a) do agregado no concreto, e b) teórica da pasta de cimento.	143
Figura 6.21 Resistência à compressão dos concretos em função dos valores de massa específica aparente (a) e da soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha (b) dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, para as diferentes relações a/c ou consumos de cimento.	143
Figura 6.22 Resistência média à compressão dos concretos em função da relação a/c (a) e em função dos agregados graúdos separados por densidade, e natural (b).	145
Figura 6.23 Plano de ruptura em corpo-de-prova de concreto produzido com agregado “d<1,9” após aplicação de fenolftaleína. As partículas cinzas representam os agregados compostos por pasta de cimento carbonatada, e as partículas vermelhas, a fase “cerâmica vermelha”.	145
Figura 6.24 Resistência média à compressão dos concretos em função do consumo de cimento para os agregados graúdos separados por densidade, e natural (a) e variação do consumo de cimento nos concretos produzidos com esses agregados para diferentes valores de resistência à compressão (b).	146
Figura 6.25 Correlações lineares entre os resultados de módulo de elasticidade normalizado e a porosidade: a) do agregado no concreto, e b) teórica da pasta de cimento.	147

Figura 6.26 Módulo de elasticidade dos concretos em função dos valores de massa específica aparente (a) e da soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, para as diferentes relações a/c ou consumos de cimento.	147
Figura 6.27 Módulo de elasticidade médio dos concretos em função da relação a/c (a) e em função dos agregados graúdos separados por densidade, e natural (b). ...	148
Figura 6.28 Módulo de elasticidade médio dos concretos em função do consumo de cimento para os agregados graúdos separados por densidade, e natural (a) e variação do consumo de cimento nos concretos produzidos com esses agregados para diferentes valores de módulo de elasticidade (b).	149
Figura 6.29 Correlação entre os valores de módulo de elasticidade e resistência à compressão dos concretos em função dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, e do natural (a), e em função da relação a/c (b).	150

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

RCD – Resíduos de Construção e Demolição.
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos.
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
NBR – Norma Brasileira.
NM – Norma Mercosul.
SIERESP – Sindicato das Empresas Removedoras do Estado de São Paulo.
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
RILEM – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures.
B.S.C.J. - Building Contractors Society of Japan.
NEN – Nederlands Normalisatie-instituut.
DIN - Deutsche Institut für Normung
IT C – Fração mineral de RCD do tipo cinza proveniente da usina de Itaquera.
IT V – Fração mineral de RCD do tipo vermelho proveniente da usina de Itaquera.
VI V – Fração mineral de RCD do tipo vermelho proveniente da usina de Vinhedo.
TQ – Agregado de RCD reciclado denominado “Tal Qual” proveniente de um estágio de cominuição.
B – Agregado de RCD reciclado denominado “Britado” proveniente de dois estágios de cominuição.
FRX – Fluorescência de Raios-X.
DRX – Difração de Raios-X.
HCl – Ácido Clorídrico.
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado.
C-H – Hidróxido de Cálcio.
C₃A – Aluminato Tricálcico.
AR – Argilominerais, determinados por método químico.
A – Aglomerantes, determinados por método químico.
RO – Rochas, calculadas a partir de método químico e da catação visual da fase cerâmica vermelha.
CE – Cerâmica, calculada a partir de método químico.
L – litro ou dm³.
LST – líquido de solução salina de sais de tungstênio.
CI – fase de natureza cimentícia, determinada visualmente pela catação.
R – fase composta por rocha, determinada visualmente pela catação.
CV – fase composta por cerâmica vermelha, determinada visualmente pela catação.
CB – fase composta por cerâmica branca, determinada visualmente pela catação.
CA – fase composta por cimento amianto, determinada visualmente pela catação.
V – fase composta por vidro, determinada visualmente pela catação.
B – fase composta por betume, determinada visualmente pela catação.
O – outras fases não classificadas.
Densidade – peso específico de líquidos e de suspensões sólidas empregadas na metodologia de separação desta tese.
MEA – massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados (kg/dm³), que considera os poros abertos no volume da partícula.

MER – massa específica real dos agregados graúdos de RCD reciclados (kg/dm^3), que considera apenas os poros fechados no volume da partícula.

Mu- Muscovita.

Fl-Flogopita.

Il – Ilita.

E – Etringita.

Me – Merlionita.

Ca- Caulinita.

Si- Sílica.

Mi- Microclínio.

Al- Albite

C ou CaCO_3 - Carbonato de Cálcio ou Calcita.

Gi – Gismondina.

Mn – Montmorilonita.

Hi – Hidrocalumita.

B – Bassanita.

D - Dolomita.

Q – Quartzo.

O – Ortoclásio.

An – Antigorita.

R – Rosenhita.

S – Scawtita.

Mi – Microclínio.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Uma estimativa aponta para um montante de 68,5 milhões de toneladas por ano, visto que 137 milhões de pessoas vivem no meio urbano. Praticamente todos os países no mundo investem num sistema formal de gerenciamento para reduzir a deposição ilegal e sistemática, que causa assoreamento de rios, entupimento de bueiros, degradação de áreas e esgotamento de áreas de aterros, além de altos custos sócio-econômicos, especialmente em cidades de médio e grande porte. Esse gerenciamento, no Brasil, está previsto na resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 do ano de 2002, cabendo aos municípios a definição de uma política municipal para RCD, sendo fundamental a reciclagem da fração de origem mineral, pois representa 90% da massa desse resíduo.

Mesmo na União Européia, da qual participam países como a Holanda, Dinamarca, Alemanha com índices de reciclagem desse resíduo entre 50% e 90%, existem países com índices inferiores a 50%, como Portugal e Espanha. No cenário nacional, a pequena escala de produção das usinas de reciclagem da fração mineral do RCD, em sua maioria pertencentes ao setor público e com produção voltada para o consumo interno das prefeituras, faz com que os índices de reciclagem sejam modestos. As usinas de reciclagem nacionais são relativamente simples se comparadas às estrangeiras.

No Brasil como em outros países, a reciclagem da fração mineral do RCD gera agregados para pavimentação e material de enchimento para aterros. O emprego na fabricação de produtos à base de cimento (concreto, blocos, argamassas etc.) é menor.

Tanto no Brasil como em outros países, a maior parte do mercado dos agregados é voltada para o emprego em concretos e em argamassas. No Brasil, a

reciclagem de toda fração mineral do RCD como agregados ocuparia apenas cerca de 20% do mercado de produtos à base de cimento.

Assim, o emprego dos agregados reciclados provenientes da fração mineral do resíduo de construção e demolição (RCD) em concretos é importante para ampliar mercado e gerar produtos de maior valor, contribuindo para o aumento dos índices de reciclagem.

Sabe-se que o emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos é viável, inclusive da fração miúda. No entanto as normas para uso de agregados de RCD reciclados em concretos não são facilmente aplicáveis nas usinas de reciclagem pela: a) heterogeneidade da composição do RCD e variabilidade das propriedades dos agregados reciclados (ANGULO, 2000), b) falta de controle das operações de processamento, c) quantificação de fases no material, por análise visual, que é subjetiva, não garante homogeneidade do produto final, e não apresenta uma relação clara com o desempenho dos concretos.

Esta fundamentação é apresentada nos capítulos 2 e 3 desta tese, sendo discutido o estado-da-arte sobre o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição e a reciclagem da fração mineral de RCD como agregados para concretos, respectivamente.

Até o presente momento, pouco se discute sobre: a) a natureza química e mineralógica dos agregados de RCD reciclados (MULLER, 2003; BIANCHINI *et al.*, 2005), b) o controle da porosidade desses agregados através da separação por densidade (RILEM RECOMMENDATION, 1994), e c) a influência da porosidade dos agregados separados por densidade no comportamento mecânico dos concretos.

Conseqüentemente, o objetivo desta tese é identificar as características dos agregados de RCD reciclados que exerçam influência relevante no comportamento mecânico dos concretos.

Para atingir este objetivo, as seguintes etapas experimentais são propostas:

- a) analisar a composição química e mineralógica das frações granulométricas de amostras representativas de agregados de RCD reciclados, conforme a abordagem metodológica da Figura 1.1;
- b) analisar as propriedades físicas dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, assim como a composição química, mineralógica e por fases, conforme a abordagem metodológica da Figura 1.2; e
- c) analisar a influência das características dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade no comportamento mecânico dos concretos, conforme a abordagem metodológica da Figura 1.3.

Figura 1.1 Abordagem metodológica da primeira etapa experimental desta tese.

Figura 1.2 Abordagem metodológica da segunda etapa experimental desta tese.

Figura 1.3 Abordagem metodológica da terceira etapa experimental desta tese.

As etapas experimentais são apresentadas respectivamente nos capítulos 4, 5 e 6. O capítulo 4 apresenta uma caracterização química e mineralógica detalhada das frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados, incluindo um método para estimativa dos teores de aglomerantes e de argilominerais presentes. O capítulo 5 apresenta a influência da separação por densidade nas propriedades físicas dos agregados graúdos de RCD reciclados, assim como na composição química, mineralógica e por fases. O capítulo 6 demonstra a influência dessas características no comportamento mecânico dos concretos. O capítulo 7 se refere à conclusão.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – DEFINIÇÃO, IMPACTO E GERENCIAMENTO

O objetivo deste capítulo é definir os resíduos de construção e demolição bem como apresentar o impacto destes resíduos nas cidades e os procedimentos adotados para o seu gerenciamento adequado.

2.1 Definição dos resíduos de construção e demolição

Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são considerados todo e qualquer resíduo oriundo das atividades de construção, sejam eles de novas construções, reformas, demolições, que envolvam atividades de obras de arte e limpezas de terrenos com presença de solos ou vegetação (ANGULO, 2000; FERRAZ *et al.*, 2001; EC, 2000; WILSON, 1996; SCHULTMANN; RENTZ, 2000).

Eles incluem diferentes materiais, tais como diferentes tipos de plásticos, isolantes, papel, materiais betuminosos, madeiras, metais, concretos, argamassas, blocos, tijolos, telhas, solos, e gesso, dentre outros.

A porção composta por concretos, argamassas, blocos, tijolos, telhas, solos, gesso, etc. dos resíduos de construção e demolição (RCD) é de origem mineral. Esta é predominante no RCD, representando aproximadamente 90%, na relação m/m, no Brasil (BRITO, 1998; CARNEIRO *et al.*, 2000), na Europa (EC, 2000; HENDRIKS, 2000) e em alguns países asiáticos (HUANG *et al.*, 2002).

O RCD tem, no mínimo, duas fontes de geração típicas: construção e demolição (ANGULO, 2000). Em diversos países, os resíduos da construção representam de 19 a 52% (m/m) do RCD, enquanto que os resíduos de demolição representam de 50 a 81% (m/m) do RCD (ANGULO, 2000).

No Brasil, estima-se que mais de 50% do RCD é originado da construção (construção informal e canteiros de obras) (SINDUSCON-SP, 2005), proveniente de perdas físicas (SOUZA, 1999). Existem poucas informações sobre a participação das reformas na geração de RCD visto que, muitas vezes, elas são consideradas como resíduos de demolições. Em Hong Kong, o resíduo gerado na construção também representa a maior parcela do RCD (POON *et al.*, 2001). Na Europa, os resíduos provenientes de demolições ultrapassam 50% do total de RCD (LAURITZEN, 1994; PERA, 1996).

Os teores de materiais minerais presentes no RCD variam entre canteiros de obras e entre países (BOSSINK; BROUWERS, 1996; PINTO, 1986), assim como os de materiais não-minerais. Os teores de madeira são mais significativos na Inglaterra (HARDER; FREEMAN, 1997), nos Estados Unidos (EPA, 1998) e na Austrália (QUEENSLAND, 2003). O teor de resíduos de asfalto é mais expressivo na Holanda (HENDRIKS, 2000). Estes resíduos podem representar grande parte do resíduo da construção na Inglaterra e na Austrália. O mesmo ocorre com os resíduos de demolição (SCHULTMANN; RENTZ, 2000; HOBBS, HURLEY, 2001).

2.2 Impacto dos resíduos de construção e demolição nas cidades

O RCD representa de 13 a 67% em massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tanto no Brasil como no exterior, cerca de 2 a 3 vezes a massa de lixo urbano (JOHN, 2000; HENDRIKS, 2000).

No Brasil, a geração de RCD *per capita* foi estimada em 500 kg/hab.ano, mediana para algumas cidades brasileiras (PINTO, 1999). Na Europa, a média de geração é acima de 480 kg/hab.ano (SYMONDS, 1999).

Segundo dados do IBGE¹, a população brasileira atual é de aproximadamente 170 milhões de pessoas, sendo que 137 milhões vivem no meio urbano. Com isso, teríamos um montante de resíduos, por estimativa, da ordem de $68,5 \times 10^6$ t/ano (ANGULO *et al.*, 2002a), valor que representa em torno de 40% da geração de RCD

¹ <http://www.ibge.gov.br>

(sem solos) dos países da União Européia (SYMONDS, 1999). A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com mais 17 milhões de pessoas, gera aproximadamente na ordem de $5,5 \times 10^6$ t/ano de RCD (ANGULO *et al.*, 2002a).

Quando ignorados, os RCD são responsáveis por deposições ilegais tanto no Brasil como no exterior (PINTO, 1999; ELIAS-OZKAN, 2001; EC, 2000). Na cidade de São Paulo, como exemplo, mais de 20% dos RCD são depositados ilegalmente dentro da cidade, gerando um custo de R\$ 45×10^6 /ano para coleta-transporte-transbordo e deposição deste resíduo no aterro (SCHNEIDER, 2003).

Desta forma, o gerenciamento do RCD tradicionalmente praticado no Brasil e no exterior pelo poder público é caracterizado pela limpeza repetida de áreas de deposição ilegal dentro da malha urbana, como exemplificado na Figura 2.3, e destinação do resíduo em aterros sanitários municipais (PINTO, 1999; SYMONDS, 1999; EC, 2000; ELIAS-OZKAN, 2001; SCHNEIDER, 2003). A existência de multas em razão da deposição irregular é, via de regra, a única política voltada para o gerador do resíduo.

Os efeitos da deposição irregular na malha urbana são (PINTO, 1999; BRITO, 1998; GALIVAN, BERNOLD, 1994): a) assoreamento de córregos e rios, b) entupimento de galerias e bueiros, c) degradação de área urbanas e d) proliferação de escorpiões, aranhas e roedores que afetam a saúde pública.

Figura 2.1 Deposição ilegal na cidade de São Paulo. (a) rua utilizada como depósito clandestino limpa pela prefeitura em 30/08/2002. (b) a mesma rua após 2 meses. Fonte: Vanderley M. John.

Da mesma forma, a grande massa de RCD existente nas cidades contribui para o esgotamento de aterros (ZORDAN, 1997; GALIVAN; BERNOLD, 1994; SYMONDS, 1999; EC, 2000), principalmente em cidades de grande porte, pois o resíduo é tradicionalmente aterrado nos mesmos locais que os RSU (SYMONDS, 1999; EC, 2000).

A solução comum para deposição desses resíduos, portanto, são aterros privados, grande parte dos quais clandestinos. Embora o RCD seja considerado inerte pela NBR 10.004 (ABNT, 1987a), ANGULO e JOHN (2002a) mostram, a partir de um levantamento bibliográfico internacional, que componentes orgânicos como plásticos, tintas, óleos, asfaltos e madeiras, bem como o amianto e algumas substâncias inorgânicas como manganês podem contaminar aterros ou colocar em risco a saúde das pessoas.

Na Alemanha, a maior parte dos resíduos perigosos presentes no RCD vem do tratamento superficial das edificações, como pinturas e sistemas de proteção (TRANKLER *et al.*, 1996; SCHULTMANN *et al.*, 1997; WAHLSTROM *et al.*, 1997; SCHULTMANN; RENTZ, 2000). Estimou-se a presença de 58 toneladas de biofenilas policloradas (PCB) no RCD europeu no ano de 2001 (CHRISTENSEN *et al.*, 2002).

É evidente então a necessidade de gestão específica para os resíduos perigosos presentes no RCD como, por exemplo, o já realizado com o amianto na União Européia (EC, 2000).

2.3 Estratégias para o gerenciamento adequado dos resíduos de construção e demolição

Muitos países investem num sistema formal de gerenciamento, como a Holanda (HENDRIKS, 2000) e o Reino Unido (HOBBS; HURLEY, 2001).

Quase todas as políticas incluem a reciclagem dos resíduos, visto que a mesma reduz (PINTO, 1999; EC, 2000): (a) a utilização de aterros, (b) a ocorrência

de deposições irregulares, (c) o consumo de recursos naturais não-renováveis e (d) impactos ambientais das atividades de mineração.

O Brasil segue a mesma tendência. O sistema é composto por companhias licenciadas para transporte, pontos de coleta de RCD para pequenos e grandes geradores (estações de transbordo) e aterros de inertes para recuperação de áreas degradadas incluindo ou não usinas de reciclagem (PINTO, 1999).

Esse gerenciamento é um grande negócio, mesmo quando feito da forma tradicional. Na cidade de São Paulo, calcula-se que o gerenciamento (coleta-transporte-deposição) já movimenta algo em torno de R\$ 80 milhões de reais/ano (JOHN; AGOPYAN, 2000), com aproximadamente 700 empresas transportadoras de pequeno porte envolvidas (SIERESP, 2003).

As estratégias necessárias de serem adotadas no gerenciamento de RCD podem ser resumidas nos itens seguintes (JOHN *et al.*, 2004).

2.3.1 Evitar deposições ilegais

No Brasil como em outros países, as deposições ilegais de RCD ocorrem em função dos custos e distâncias que envolvem o transporte desse resíduo, especialmente em cidades de médio e grande porte (SYMONDS, 1999; PINTO, 1999; HENDRIKS, 2000).

Embora existam leis que proíbem tal atividade, ela só se torna menos efetiva quando também é menos interessante do ponto de vista econômico. Para isso, é necessário o posicionamento estratégico de áreas de coleta dentro da malha urbana de forma a minimizar a distância e o custo de transporte (PINTO, 1999).

No ano de 1999, foi aprovado pela prefeitura de São Paulo o decreto 37.952, regulamentando as atividades dessas empresas transportadoras (OLIVEIRA *et al.*, 2001). A responsabilidade solidária entre gerador e transportador nas atividades de transporte e destinação do RCD foi regulamentada em São Paulo por meio do decreto Municipal 13.298, no ano de 2002 (SIERESP, 2003).

2.3.2 Segregar os tipos de materiais do RCD na fonte

Na Europa, o RCD reciclável não pode ser depositado em aterros sanitários (WILSON, 1996; HENDRIKS, 2000; EC, 2000; KOWALCZYK *et al.*, 2000) ou, quando a legislação permite, esta operação é fortemente taxada (HOBBS; HURLEY, 2001; SCHULTMANN *et al.*, 2001).

A triagem passa a ser interessante, visto que reduz os custos de deposição, além de facilitar a reciclagem, uma vez que determinados tipos de materiais presentes no RCD podem ser reciclados por processos distintos. Na Alemanha, se o RCD estiver misturado com amianto, os custos de deposição em aterros podem alcançar R\$ 1.500,00/t² (SCHULTMANN *et al.*, 2001). Assim, ela é uma forma de aumentar a reciclabilidade do resíduo (VILLALBA *et al.*, 2002).

No Brasil, a Resolução nº 307 do CONAMA classifica os RCD em (CONAMA, 2002):

- a) Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados compostos por diversos materiais de origem mineral, tais como produtos à base de cimento como blocos, concretos, argamassas, etc; produtos cerâmicos como tijolos, telhas etc; rochas e solos entre outros.
- b) Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, asfaltos e outros.
- c) Classe C: resíduos sem tecnologia de reciclagem disponível como, no caso brasileiro, o resíduo do gesso.
- d) Classe D: resíduos considerados perigosos, como tintas, solventes, óleos e outros.

Esta triagem é realizada nos pontos de pequenos ou grandes geradores, ou em estações de triagem, comuns em países como Alemanha (aproximadamente 50 até o ano de 1997) (KOHLER; PENZEL, 1997), Brasil (Figura 2.2), Japão

² Taxa de conversão em 07/06/2003, 1 euro equivale a 3,53 reais.

(SUZUKI, 1997) e Inglaterra (O'ROURKE, 2002). Algumas destas estações chegam a operar com catação manual sobre esteiras, separando os tipos de resíduos recicláveis dos não recicláveis (SUZUKI, 1997). A separação mecanizada é uma opção quando o objetivo é aumentar a eficiência de seleção e melhorar as condições de higiene e segurança dos trabalhadores nestas estações (HANISCH, 1998).

Figura 2.2 Classificação da madeira presentes no RCD (classe B) em uma estação de transbordo na cidade de São Paulo. Fonte: Tarcísio de Paula Pinto.

A cidade de São Paulo foi pioneira na instalação de estações de transbordo e de triagem no Brasil e conta atualmente com duas estações com capacidade de recepção de 1.250 t/dia: uma de empresas atuantes na região noroeste e oeste com sede no bairro Freguesia do Ó e outra de empresas atuantes na região central e norte com sede no bairro Jaçanã. Existe previsão de implantação de mais duas estações (SIERESP, 2003). O produto de maior valor agregado na venda é o resíduo de metais ferrosos e não-ferrosos (FERRAZ *et al.*, 2001).

Na Inglaterra, uma pesquisa na região de Nottingham mostrou que o aumento da triagem de RCD nas estações de transbordo não é diretamente proporcional à redução da presença deste resíduo em aterros (O' ROURKE, 2002). Isso mostra que somente a triagem, embora importante, não é suficiente para viabilizar a reciclagem que carece de mercado, especificações de produtos, além do alto custo de processamento.

Angulo (1998) constatou que a triagem de determinados tipos de materiais presentes no RCD é prática comum nos canteiros de obras visitados na cidade de

Londrina, e que esses tipos são misturados na caçamba, inclusive com o lixo orgânico convencional, por se tratar de um equipamento inadequado para esse tipo de coleta. A triagem no momento da geração em canteiros de obras está sendo empregada (Figura 2.3) na cidade de São Paulo, sendo considerada interessante porque permite a comercialização do resíduo não mineral, principalmente madeiras e metais ferrosos, e reduz o volume de resíduo transportado por caçambas. Já na China, esse processo é considerado viável somente quando o custo de aterramento for acima de R\$ 40,00/t³ (POON *et al.*, 2001).

Figura 2.3 Coleta seletiva em canteiros de obras realizada na cidade de São Paulo (Fonte: Francisco Antunes de Vasconcellos Neto).

A demolição seletiva, a qual é realizada de forma a facilitar a triagem ou coleta seletiva do RCD da demolição, começou a ser investigada antes da triagem em canteiros de obras. Ela tem por objetivo reduzir a quantidade de contaminantes⁴ (amianto, gesso, fração não mineral entre outros) no RCD reciclável e melhorar a qualidade do agregado reciclado produzido (TRANKLER *et al.*, 1996; WAHLSTROM *et al.*, 1997; MULDER, 1997; RUCH *et al.*, 1997; SCHULTMANN *et al.*, 1997; HENDRIKS, 2000; FREIRE; BRITO, 2001). Existem legislações

³ 1 HK\$=0,1287 US\$=0,36036 R\$

⁴ Contaminantes são substâncias que prejudicam tecnicamente o processo de reciclagem da fração mineral do RCD (sulfatos e álcalis solúveis, metais ferrosos, entre outros), o meio ambiente ou o ser humano (sulfatos, compostos orgânicos voláteis, metais pesados, amianto).

específicas para essa atividade na Alemanha (NICOLAI, 1995) e na Inglaterra (HOBBS, HURLEY, 2001).

A seleção do resíduo de concreto, do resíduo de alvenaria e do resíduo misto, mediante demolição seletiva na Europa, é um exemplo de triagem com o objetivo de melhorar a qualidade do RCD mineral para uso do agregado reciclado em concretos (RILEM RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000; FREIRE; BRITO, 2001). No Brasil, como este tipo de seleção raramente é aplicado, o RCD mineral proveniente de demolições é misto (Figura 2.4) e apresenta três materiais minerais básicos (concretos/argamassas, cerâmicas e rochas).

Figura 2.4 RCD mineral misto pela ausência de procedimentos de coleta seletiva (foto do autor).

Apesar da existência de empresas de demolição com tecnologia disponível para realizar a demolição seletiva de componentes de concretos⁵ no Brasil, ela só ocorre com o objetivo de revenda de materiais de construção reutilizados, como já diagnosticado na cidade de Londrina (ANGULO, 1998) (Figura 2.5), e semelhante ao que ocorre na Turquia (ELIAS-OZKAN, 2001).

⁵ <http://www.demolidoradiez.com.br/>

Figura 2.5 Reaproveitamento de materiais de construção em demolições na cidade de Londrina (foto do autor).

Falta um levantamento detalhado brasileiro sobre o mercado de demolição na reutilização dos resíduos. Não existe uma entidade representativa desse setor no Brasil.

Apesar da existência de comitê de pesquisa e desenvolvimento em demolição seletiva de estruturas de concreto atuante por mais de 20 anos na Holanda, apenas 1% do mercado emprega tais técnicas. Quando demolida seletivamente neste país, a edificação é separada em cinco grupos: resíduos perigosos, elementos de reutilização como madeiras e vidros; estruturas de concreto; elementos de alvenaria, telhas e pisos e estruturas de aço (KOWALCZYK *et al.*, 2000).

2.3.3 Estimular a reciclagem

A reciclagem das frações não minerais do RCD, como madeira, plástico entre outros, desde que segregados, é facilmente praticada visto que existem em cidades de médio e grande porte catadores ou empresas especializadas na coleta e reciclagem de metais, papéis, plásticos, madeiras, etc.

No entanto o mesmo não ocorre para a fração mineral do RCD que representa grande parte do resíduo em massa. Apesar da reciclagem de RCD ser uma atividade bem antiga, um documento da União Européia descreve que apenas 25% dos RCD são reutilizados ou reciclados, apesar do seu grande potencial. Existem países na Europa com índice de reciclagem de até 90% como Dinamarca, Bélgica e Holanda, e

outros países com índices menores que 50% como Portugal e Espanha (EC, 2000). Uma forma de aumentar esses índices seria criar um conjunto de normas que encoraje e regule tais utilizações.

Neste sentido, no Brasil, a Câmara Ambiental da Indústria da Construção do Estado de São Paulo⁶, órgão da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), contando com a participação da cadeia produtiva, universidade e consultores entre outros, preparou diversas propostas de normas, discutidas e publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que são as seguintes:

- a) NBR 15.112 – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – áreas de transbordo e triagem – diretrizes para projeto, implantação e operação;
- b) NBR 15.113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – diretrizes para projeto, implantação e operação;
- c) NBR 15.114 – Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação;
- d) NBR 15.115 – Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos; e
- e) NBR 15.116 - Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos.

A partir do ano de 2002, a Prefeitura de São Paulo implementou especificações internas de serviço baseadas nessas normas, permitindo a implantação de aterro de inertes por empresas privadas, como o extinto aterro de Itatinga e o atual aterro de Itaquera (Figura 2.6), adicionalmente aos da prefeitura. Além disso, torna possível o emprego dos agregados de RCD reciclados nas atividades de pavimentação do município.

⁶ http://www.sindusconsp.com.br/CAMARA_AMBIENTAL/index.htm

(a)

(b)

Figura 2.6 Imagens dos aterros de RCD mineral em (a) Itatinga e (b) Itaquera

É importante observar que, do ponto de vista de mercado, no Brasil, caso todo o RCD de origem mineral ($61,6 \times 10^6$ t/ano⁷) seja empregado como agregados de construção civil, sem desconsiderar a contribuição do gesso e do vidro, a participação seria de 16,2%, pois o consumo de agregados está na ordem de 380×10^6 t/ano (Angulo *et al.*, 2002a). Desta forma, o agregado de RCD reciclado é apenas uma fonte de matéria-prima alternativa para o setor de produção de agregados naturais, podendo essa reciclagem ser incorporada pelo setor.

Uma discussão sobre o mercado de agregados e matérias-primas para as indústrias de cimento e cerâmica é apresentada em Angulo *et al.* (2002a) e Angulo *et al.* (2003a) a partir da análise de dados disponíveis na bibliografia como KULAIF (2001), WHITAKER (2001), TANNO; MOTTA (2000) entre outros.

A Figura 2.7 mostra o consumo brasileiro de alguns setores de agregados e de matérias-primas para a indústria do cimento e cerâmica bem como a geração nacional estimada para a fração mineral do RCD.

⁷ Vide estimativa do RCD e dos teores da parcela mineral no RCD no item 2.2.

Figura 2.7 Geração nacional estimada de RCD mineral e mercados potenciais para a reciclagem.

O setor público de agregados que considera as atividades de pavimentação e obras públicas pode consumir em torno de 84% na geração nacional da fração mineral do RCD. Na Europa, o setor de pavimentação é capaz de absorver de 50% a 70% da massa total do RCD (COLLINS, 1997; BREUER *et al.*, 1997; TOMAS *et al.*, 1997; ANCIA *et al.*, 1999; TOMAS *et al.*, 1999; HENDRIKS, 2000; DIJK *et al.*, 2002; XING *et al.*, 2002; SCHULTMANN; RENTZ, 2000; KOWALCZYK *et al.*, 2000; KOHLER; KURKOWSKI, 2002; MÜLLER, 2003). Caso toda a fração mineral do RCD seja utilizada neste setor, seria evidente a saturação do mercado como já ocorre na Holanda (MULDER *et al.*, 2003). Diferentemente de países europeus, no Brasil, o setor de pavimentação e obras públicas é virtualmente controlado pelo setor público (KULAIF, 2001; FARINA *et al.*, 1997).

Tanto no Brasil como no exterior, o uso do RCD reciclado como agregado em atividades de pavimentação ganhou popularidade, uma vez que as exigências de qualidade como produto são menores que as exigências de qualidade para uso em concreto (RILEM RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000; ISWB, 2001). Essa prática é conhecida como reciclagem de baixo valor (KOHLER; PENZEL, 1997; HENDRIKS, 2000; KIBERT; CHINI, 2000; PELLETIERE, 2001).

Os agregados do setor privado são majoritariamente empregados em concretos e argamassas e podem absorver integralmente a fração mineral do RCD reciclada sem que, com isso, a participação no mercado ultrapasse os 20%. Além disso, em tais utilizações, os agregados de RCD reciclados adquirem maior valor agregado como produto. Semelhantes conclusões são citadas na Holanda (HENDRIKS, 2000; DIJK *et al.*, 2002).

No ano de 2002, um grupo multidisciplinar composto por voluntários da Business School of São Paulo e da Escola Politécnica, sob coordenação técnica conjunta deste autor e dos pesquisadores M. Eng. Leonardo F.R. Miranda e Profa. Dra. Silvia M. S. Selmo, elaborou um plano de negócio premiado⁸, que previa a comercialização de areia de RCD reciclada com finalidade sócio-ambiental, projeto de parceria com a Prefeitura de São Paulo e o Instituto de Cidadania Empresarial. Algumas constatações durante a elaboração deste plano devem ser destacadas:

- a) a grande vantagem competitiva dos agregados reciclados é a capacidade de minimizar as distâncias de transporte entre produção e consumidor final (em torno de 100 km a 150 km para areia (WHITAKER, 2001; FARINA *et al.*, 1997) e em torno de 30 a 50 Km para pedras britadas na cidade de São Paulo (AZEVEDO *et al.*, 1990; EC, 2000), responsável por 2/3 dos custos do produto (WHITAKER, 2001);
- b) entretanto, no meio urbano, a produção das usinas não pode ser muito elevada para não entrar em confronto com a legislação urbana como acontece com as empresas de agregados naturais (FARINA *et al.*, 1997; COELHO; CHAVES, 1998);
- c) o mercado de areia pode ser um bom mercado para agregados reciclados, pois se trata de um mercado de pequena competitividade formado por empresas de pequeno e médio porte, em sua maioria, incluindo empresas clandestinas de

⁸ Reportagem do jornal Estado de São Paulo, dia 28 de novembro de 2002, intitulada “Projeto Casulo leva escola e centro cultural à favela”.

extração (AZEVEDO *et al.*, 1990; FARINA *et al.*, 1997) e com necessidade de fontes alternativas de matéria-prima; e

- d) o mercado de pedras britadas, por sua vez, é um mercado competitivo formado por um setor organizado em que empresas de grande porte representam a maior parte do fornecimento e trabalham com capacidade ociosa (em torno de 60%) (KULAIF, 2001; NETO *et al.*, 1990).

Em países como a Alemanha, o transporte do RCD diretamente para uma usina de reciclagem de RCD é considerado interessante do ponto de vista econômico, quando a distância compreendida entre a usina e o RCD não ultrapassa os 25 Km (KOHLEK; PENZEL, 1997).

Na Inglaterra, estava prevista uma tributação diferenciada sobre os agregados naturais para o ano de 2002, com objetivo de tornar o uso de agregados de RCD reciclados mais competitivo do ponto de vista econômico (HOBBS; HURLEY, 2001). Esse tipo de tributação diferenciada para agregados naturais também ocorre na Suécia, Dinamarca e Holanda (FHA, 2000).

2.4 Conclusões do capítulo

Os RCD são majoritariamente de origem mineral no Brasil. No entanto eles contêm importante fração de diferentes tipos de plásticos, papel, madeira, materiais betuminosos entre outros, inclusive resíduos perigosos.

A composição da fração mineral do RCD é variável, pois é uma mistura de componentes construtivos como concretos, argamassas, cerâmicas, rochas naturais, entre outros. Ela depende da origem do resíduo.

Os RCD geram diversos impactos ambientais em cidades de médio e grande porte tais como o uso de áreas de aterros, deposições irregulares, assoreamento de córregos, entupimento de galerias e bueiros entre outros. Deve-se gerenciar, portanto, adequadamente o RCD com o objetivo de minimizar os seus impactos ambientais e econômicos nas cidades. Esse gerenciamento deve contemplar os seguintes itens: a) evitar as deposições irregulares por meio de regulamentações e uma rede de atração

para esses resíduos que minimize os custos de transporte e de coleta-deposição, b) triar os resíduos com o objetivo de aumentar a reciclabilidade deles e reduzir os riscos ambientais, c) estimular a reciclagem por meio de especificações, decretos e normas técnicas que encorajem as utilizações dos materiais reciclados em mercados mais competitivos.

O uso da fração mineral do RCD é fundamental para se atingir reciclagem massiva. Essa fração pode ser absorvida integralmente no mercado de agregados para uso em concreto e argamassa sem que, com isso, a participação no mercado ultrapasse os 20%.

3 RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DO RCD COMO AGREGADO E O EMPREGO EM CONCRETOS

O objetivo deste capítulo é apresentar o estado-da-arte da reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição como agregados e o emprego em concretos.

3.1 Reciclagem da fração mineral do RCD como agregado

As tecnologias do Tratamento de Minérios são aplicadas na reciclagem do RCD. O Tratamento de Minérios é uma sequência de operações unitárias e tem o objetivo de, a partir de um minério, produzir um concentrado com qualidade física e química adequada à sua utilização pela indústria de transformação (metalúrgica, química, cerâmica, vidreira, etc) (CHAVES, 1996). Nesse tratamento, não existe qualquer alteração da estrutura interna do mineral tais como reações químicas, metalúrgicas ou cerâmicas. JONES (1987), SANT'AGOSTINO; KAHN (1997), LUZ *et al.* (1998) e CHAVES (1996) apresentam revisões sobre esse tema.

As operações unitárias do Tratamento de Minérios são de quatro tipos (CHAVES, 1996): de redução de tamanho, de separação de tamanho, de concentração e auxiliares.

Alguns dos equipamentos empregados nesse tratamento estão resumidos na Tabela 3.1 (LUZ *et al.*, 1998; KAHN, 1999; SMITH; COLLIS, 1993).

Tabela 3.1 Descrição de alguns equipamentos industriais utilizados nas operações unitárias (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997 adaptado; KELLY; SPOTTISWOOD, 1982).

Operação unitária	Tipo de operação	Equipamentos industriais
Cominuição	britagem	mandíbula, giratório, impacto, rolos, etc
	moagem	moinho de bolas, de barras, de martelos, vibratório, Raymond, etc
Separação de tamanho	classificadores	horizontais, verticais, espiral, ciclones
	peneiramento	rotativo, vibratório
Concentração	por densidade	calha simples, calha estrangulada, espirais, mesa plana, jigues, mesa vibratória, ciclones ou cones de meio denso, equipamentos de meio denso
	por susceptibilidade magnética	Ímã de mão, separador de rolos induzidos, separador magnético de alto gradiente.
	por condutibilidade elétrica	Separador de rolos, separador de placas, separador de alta tensão.
	físico química de superfície	Condicionadores, células ou colunas de flotação.

A Tabela 3.2 mostra um resumo das operações unitárias e equipamentos empregados nas usinas fixas nacionais de reciclagem da fração mineral do RCD como agregado.

Tabela 3.2 Operações unitárias e equipamentos empregados nas usinas fixas nacionais de reciclagem da fração mineral do RCD como agregado.

Usinas de reciclagem	Equipamentos de redução	Equipamentos de classificação	Operação de concentração	Auxiliares
<i>Santo André (SP)</i> ¹	Britador de impacto (10 t/h)	Peneira # 12,7 mm	Catação (AC)	1 TC
<i>São Paulo(Itaquera) (SP)</i>	Britador de impacto (100 t/h)	Peneiras # 40, 20 e 4,8 mm	Catação (AC/PC) Sep. Magnética	2 TC
<i>Vinhedo (SP)</i>	Britador de mandíbulas (8 t/h)	Peneiras # 12,7, 9,5 e 4,8 mm	Catação (AC)	1 TC 1 AP
<i>Londrina (PR)</i>	Britador de impacto	Peneiras # 4,8 mm	Catação (AC)	1 TC
<i>Belo Horizonte (Pampulha) (MG)</i> ⁴	Britador de impacto (30 t/h)	Peneiras	Catação (AC) ⁵	1 AP 1 TC
<i>Belo Horizonte (Estoril)(MG)</i> ³	Britador de impacto (25 t/h)	nd	Catação (AC)	1 TC
<i>Ribeirão Preto (SP)</i> ²	Britador de impacto (30 t/h)	nd	Catação (AC) Sep. magnética	1 TC 1 AP

nd significa não-detectado.

AC significa “antes da cominuição” e PC significa “após a cominuição”.

TC significa “transportadores de correia” e AP significa “abatedores de poeira”.

¹ Usina piloto. Atualmente desativada e ² Conforme ZORDAN (1997).

³ Conforme PINTO (1999), ⁴ Fonte: Leonardo F.R. Miranda e ⁵ Realizada em pilhas horizontais.

A definição, bem como as principais operações unitárias empregadas na reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição, são discutidas a seguir.

3.1.1 Cominuição

As operações de redução de tamanho, também conhecidas como de cominuição, são utilizadas normalmente para se reduzir o tamanho das partículas para o transporte, para o uso final e/ou para as operações unitárias subsequentes. Estas operações são de dois tipos (CHAVES, 1996; LUZ *et al.*, 1998): britagem ou moagem, dependendo da granulometria do material.

A cominuição é uma atividade de custo elevado, tanto em função do consumo de energia, quanto devido ao consumo de peças de desgaste, exigindo equipamentos robustos que demandam pouca manutenção (WILSON, 1996; CHAVES, 1996; LUZ *et al.*, 1998).

Dentre as operações, somente a britagem é normalmente empregada na reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição. Ela pode ser repetida várias vezes e reduz as partículas por meio de ação mecânica externa como força de compressão (britagem por mandíbula) ou impacto (britagem por impacto) (SMITH; COLLIS, 1993; LUZ *et al.*, 1998; CHAVES, 1996). É um processo normalmente realizado a seco e é dificultado pela heterogeneidade e anisotropia das fases minerais (CHAVES, 1996; MOMBER, 2002).

Embora existam na Europa usinas⁹ com um único estágio de cominuição (normalmente britador de impacto) como no Brasil, são mais frequentes usinas com cominuição em dois estágios, um primário com britador de mandíbulas e outro secundário com britador de impacto ou vice-versa (HENDRIKS, 2000). A cominuição secundária é empregada para otimizar a granulometria dos agregados de RCD reciclados (GRUBL; RUHL, 1998).

⁹ Empresa holandesa *Van Benthum Recycling Centrale*, em Utrecht.

É também possível, na cominuição por britador de impacto, otimizar a separação entre as rochas naturais e as argamassas presentes nos agregados de concretos reciclados pela fratura intergranular (TOMAS *et al.*, 1997; TOMAS *et al.*, 1999). Essa tecnologia é pesquisada na Alemanha. A fração representada pelas rochas naturais com granulometria compreendida entre 2 a 16 mm apresenta qualidade semelhante ao agregado natural, especialmente interessante para o emprego em concretos.

Outro estudo da Alemanha investiga a liberação entre as rochas e argamassa através da cominuição por descarga elétrica (MULLER; LINSZ, 2004). Nesse estudo, outros métodos de liberação são discutidos, empregando cominuição combinada com abrasão através do emprego de moinhos de eixos excêntricos.

3.1.2 Separação por tamanho

Essa operação separa as partículas pelo seu tamanho e pode empregar peneiras ou classificadores (pneumáticos ou hidráulicos).

O peneiramento é normalmente realizado via seca, resultando sempre uma parcela de fração fina aderida à fração graúda. O peneiramento a úmido pode ser empregado para uma separação mais eficiente entre essas frações (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982).

Na Holanda e na Alemanha, o escalpe em telas de 8 a 10 mm antes da cominuição permite separar uma fração miúda contaminada com hidrocarbonetos e dioxinas dos resíduos de demolição (WILSON, 1996; HENDRIKS, 2000; KOHLER; PENZEL, 1997). Já na Bélgica, isso não é realizado (ANCIA *et al.*, 1999).

Também são utilizados classificadores pneumáticos que geram uma corrente de ar ascendente e separam partículas leves de papel, plásticos, madeiras, etc. dos agregados de RCD reciclados (MOSKALA; SCHNEIDER-KUHN, 1997; WILSON, 1996; HANISCH, 1998; HENDRIKS, 2000; KOHLER; KURKOWSKI, 2000) (Figura 3.1). Neste caso, o equipamento é colocado nos pontos de transferência entre transportadores de correia (HANISCH, 1998).

Figura 3.1 Desenho esquemático sobre o funcionamento dos classificadores mecânicos utilizados na reciclagem da fração mineral do RCD (HENDRIKS, 2000).

WILSON (1996), HANISCH (1998) e HENDRIKS (2000) citam o emprego dos classificadores hidráulicos para retirada da fração fina ($< 0,15$ mm) presente nos agregados de RCD reciclados. Nestes classificadores, as partículas circulam em direção contrária a uma corrente de água. Os equipamentos usuais utilizam até 120 m³/h de água para o processamento de 60 a 100 t/h de sólidos (HANISCH, 1998).

HANISCH (1998) cita o uso do classificador em espiral, que tem a vantagem de utilizar uma quantidade menor de água, em torno de 30 m³/h para processar 80 t/h de sólidos, e apresenta custo mais acessível.

3.1.3 Concentração

As operações de concentração são empregadas quando existem várias espécies minerais presentes e têm por objetivo aumentar o teor de mineral útil, removendo outros minerais (sub-produtos) ou contaminantes. Esta concentração pode ser realizada utilizando diferentes propriedades físicas das espécies minerais como densidade, cor, forma, propriedades elétricas, propriedades magnéticas, etc. (CHAVES, 1996), inclusive empregando a separação por meio de análise de imagem (KOHLEK; PENZEL, 1997), sem que ocorra qualquer transformação do material. Elas são aplicadas nas usinas de reciclagem conforme os seguintes itens.

3.1.3.1 Descarte de carregamentos da fração não mineral do RCD

Nessas usinas de reciclagem, é comum classificar visualmente o RCD, evitando que carregamentos contendo teores elevados da fração não mineral sejam descarregados na usina (Figura 3.2).

Figura 3.2 Controle visual do RCD, através de câmera digital, para classificação do RCD em mineral e não-mineral.

3.1.3.2 Classificação do RCD mineral

Na Europa, a fração mineral do RCD normalmente é classificada em resíduos de concreto, resíduos de alvenaria e resíduos mistos de concreto e de alvenaria (RILEM RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000). Adicionalmente, na Alemanha, os resíduos de alvenaria podem ainda ser divididos em três classes diferentes (MÜLLER, 2004):

- a) Resíduo de tijolos: composto por tijolos recuperados em coberturas ou na pré-seleção dos resíduos de alvenaria podendo ser de natureza cimentícia ou cerâmica.
- b) Resíduos com altos teores de tijolos: compostos 80% da massa de tijolos e o restante de argamassa de assentamento e revestimentos provenientes da demolição de alvenarias.
- c) Resíduos de alvenaria mistos: compostos por tijolos, argamassas, revestimentos, concretos leves, tijolos sílico-calcários, etc. provenientes da demolição de alvenarias.

No Brasil, algumas usinas de reciclagem da fração mineral do RCD classificam nos seguintes tipos (Figura 3.3): cinza (visualmente predominante de componentes de construção de natureza cimentícia) e o vermelho (visualmente predominante de componentes de construção de natureza cerâmica, especialmente do tipo vermelha).

Figura 3.3 RCD mineral cinza (a) e vermelho (b) classificado na usina de reciclagem de São Paulo (Itaquera)/Brasil.

O agregado proveniente do RCD mineral vermelho é empregado em atividades de pavimentação, principalmente bases de pavimentos. O agregado proveniente do RCD mineral cinza é empregado preferencialmente em calçadas, em blocos de concreto e em mobiliários urbanos à base de cimento, como bancos e outros.

3.1.3.3 Catação da fração não-mineral do RCD

Após a classificação visual da fração mineral do RCD, utiliza-se comumente a catação que separa diferentes fases, manualmente, escolhidas através de diferenças de cor, forma ou textura das partículas (CHAVES, 1996; HENDRIKS, 2000). Essa operação pode ser realizada antes (Figura 3.4a) e/ou após a cominuição, de forma manual, sobre os transportadores de correia (Figura 3.4b) com o objetivo de se retirar a fração não-mineral grosseira (maior que 4,8 mm) remanescente no RCD mineral.

Figura 3.4 Catação da fração não-mineral do RCD na usina de reciclagem de São Paulo (Itaquera), antes (a) e após (b) a cominuição.

A catação nem sempre é eficiente. No Brasil, um estudo de caracterização preliminar de ANGULO (2000) realizado na usina piloto de Santo André demonstrou uma variação de 0 a 3,5% nos teores da fração não-mineral dos agregados graúdos de RCD reciclados conforme os dados apresentados na Figura 3.5.

Figura 3.5 Teor (% kg/kg) da fração não-mineral presente nos agregados graúdos de RCD reciclados da usina de reciclagem de Santo André, Estado de São Paulo, Brasil.

Na Holanda, onde a reciclagem é avançada tecnologicamente, a catação manual da fração não-mineral do RCD pode ser substituída por processos gravíticos conforme apresentado na Figura 3.6 (HENDRIKS, 2000; KOWALCZYK *et al.*, 2002; THOLE, 2002).

Figura 3.6 Separação mecânica da fração não-mineral do RCD na alimentação de usinas de reciclagem da Holanda (HENDRIKS, 2000; KOWALCZYK *et al.*, 2002; THOLE, 2002).

3.1.3.4 Separação magnética dos metais presentes no RCD

Na reciclagem da fração mineral do RCD, a concentração de materiais metálicos ferrosos é realizada por separação magnética de baixa intensidade antes e/ou após a cominuição (WILSON, 1996; HANISCH, 1998). No Brasil, ela é normalmente realizada após a etapa de cominuição (Figura 3.7).

(a)

(b)

Figura 3.7 Separação magnética dos metais ferrosos na usina de São Paulo (Itaquera) (a) e estoque da fração metálica ferrosa separada magneticamente na usina de Salzburg/Áustria (b).

Separadores de tambor de corrente induzida (Figura 3.8) podem ser utilizados para a separação de metais não-ferrosos presente no RCD (HENDRIKS, 2000;

KOWALCZYK *et al.*, 2002) em função da susceptibilidade magnética da fração a ser removida gerada por uma força magnética de alta intensidade (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982).

Figura 3.8 Separador de tambor de corrente induzida, em escala piloto, disponível no RWTH - Universidade de Aachen/Alemanha.

3.1.3.5 Concentração gravítica dos agregados de RCD reciclados

Os agregados de RCD reciclados podem ser concentrados por densidade através de diversos equipamentos. O jigue é o mais barato e separa as partículas pela sua densidade através de um leito pulsante. Assim, as partículas são estratificadas em camadas com densidade crescente da parte superior em direção à parte inferior do leito pela ação de diferentes tipos de forças resultantes do movimento descendente da partícula, sua sedimentação retardada na polpa (água e minerais), e do movimento das partículas finas entre as grossas dentro do leito formado (GAUDIN, 1932; BURT, 1984; LUZ *et al.*, 1998; XING *et al.*, 2002).

As densidades de corte para esse tipo de equipamento podem variar entre 1,6 e 2,5 kg/dm³, sendo que os cortes ótimos são entre 1,6 e 2,1 g/cm³ (ANCIA *et al.*, 1999; MOSKALA; SCHNEIDER-KUHN, 1997; BREUER *et al.*, 1997; HANISCH, 1998; XING *et al.*, 2002; MESTERS; KURKOWSKI, 1997; KOHLER; KURKOWSKI, 2000).

A Figura 3.9 mostra a fração separada dos agregados de RCD reciclados pelo jigue em uma densidade de corte entre 1,7 e 1,9 g/cm³, na Áustria. Por análise visual, a fração menor que 1,9 é predominantemente não-mineral, mas pode haver teores significativos de material mineral leve, tais como blocos de concreto celular.

Figura 3.9 Fração não mineral (lignita, isopor, madeira) separada dos agregados de RCD reciclados pelo jigue (a) e detalhe de compósito de cimento e madeira para isolamento térmico comumente presente no RCD (b) em Salzburg/Áustria.

As principais vantagens do uso do jigue são: a) redução dos teores da fração não-mineral nos agregados de RCD reciclados até 0,05% (JUNGSMANN *et al.*, 1997; JUNGSMANN; QUINDT, 1999; KOHLER; KURKOWSKI, 2000), permitindo atender exigências legislativas da reciclagem e requisitos de qualidade para uso em concretos, b) redução da emissão de particulados no processamento (JUNGSMANN *et al.*, 1997; JUNGSMANN; QUINDT, 1999; KOHLER; KURKOWSKI, 2000), c) redução do teor de finos (menores que 75 μm) presentes nesses agregados (JUNGSMANN *et al.*, 1997; JUNGSMANN; QUINDT, 1999; KOHLER; KURKOWSKI, 2000), d) aumento da massa específica aparente desses agregados, especialmente interessante para uso em concretos e d) é o equipamento de menor custo, inclusive o operacional, existindo modelos para todas as faixas de capacidade (GAUDIN, 1932).

As principais desvantagens são (JUNGSMANN; QUINDT, 1999; HENDRIKS, 2000; XING *et al.*, 2002; JUNGSMANN, 1997; KOHLER; KURKOWSKI, 2000): a) utilização de grandes volumes de água, mas que podem ser reutilizados, e b) necessidade de tratamento das lamas geradas no processamento.

Pode-se utilizar alternativamente um jigue que realiza esse processamento à seco¹⁰. Ele reduz o impacto ambiental do processo por: a) utilizar ar ao invés de

¹⁰ Allair ® - informações disponíveis em <http://www.allmineral.com>

água, b) evitar operações de recirculação de água, espessamento e deslamagem, e c) não gerar lamas.

3.1.4 Operações auxiliares

As principais operações auxiliares são transporte, secagem e homogeneização de minérios por meio de pilhas (CHAVES, 1996).

As usinas de reciclagem da fração mineral do RCD holandesas podem utilizar entre 10 e 20 transportadores de correia (HENDRIKS, 2000). O transporte de material particulado gera poeira, cujo controle exige abatedores de poeira (ZORDAN, 1997; PINTO, 1999; ANGULO *et al.*, 2003a).

3.1.5 Fluxogramas típicos das usinas de reciclagem

A Figura 3.10 apresenta o fluxograma de uma usina típica de reciclagem da fração mineral do RCD do Estado de São Paulo, Brasil. Não existem dados sobre o balanço de massas da usina. As usinas nacionais quase todas fixas e via seca são compostas pelas seguintes operações unitárias (ANGULO *et al.*, 2002b; ANGULO *et al.*, 2003b): alimentação, cominuição, separação granulométrica, catação, concentração de materiais metálicos ferrosos (em alguns casos) e auxiliares (transporte por transportadores de correia e abatimento de poeira).

Na Europa, as usinas de reciclagem por via seca são compostas pelas mesmas operações. A Figura 3.11 mostra o fluxograma de uma usina da reciclagem da fração mineral do RCD na Alemanha (MULLER, 2003). No entanto são mais sofisticados as operações e os circuitos de concentração (JUNGSMANN, 1997; MESTERS; KURKOWSKI, 1997; HANISCH, 1998; HENDRIKS, 2000; THOLE, 2002; KOHLER; KURKOWSKI, 2000) incluindo peneiramento em aberturas de malhas maiores interligadas com mais de um circuito de cominuição. A Figura 3.12 mostra o fluxograma de processamento da fração mineral do RCD já britada (partículas até 32 mm) empregando jigues que permite que os agregados de RCD reciclados sejam utilizados em concretos.

Na Áustria, uma empresa de pedras britadas adaptou seu fluxograma de processamento com o objetivo de processar agregados naturais e agregados de RCD reciclados de forma conjunta (SCHIRMBRAND, 1999).

Na Alemanha, a eficiência das operações unitárias e o balanço de massa dos produtos de uma usina de reciclagem foram analisados para se discutir a viabilidade econômica dessa usina (NICOLAI, 1995).

Figura 3.10 Fluxograma da usina de reciclagem da fração mineral do RCD de Vinhedo, Estado de São Paulo, Brasil.

Figura 3.12 Fluxograma do processamento dos agregados de RCD reciclados a úmido empregando jigue (JUNGMAHN, 1997; JUNGMAHN; QUINDT, 1999).

3.1.6 Controle de qualidade

O controle de qualidade é um aspecto relevante para qualquer setor industrial. Ele é ainda mais crítico na reciclagem, pois o RCD é composto por uma mistura de componentes construtivos originados de diferentes tipos de construções e demolições (ANGULO, 2000).

No entanto apenas um endereço da “internet”¹¹ e três bibliografias (NICOLAI, 1995; KOHLER; PENZEL, 1997; HENDRIKS, 2004) foram encontradas sobre o controle de qualidade nas usinas de reciclagem do RCD.

¹¹ <http://www.remex-parkentin.de/> acessado em 09/2002.

3.2 Uso dos agregados de RCD reciclados em concretos

3.2.1 Recomendações

A Tabela 3.3 sintetiza as principais recomendações estrangeiras (HANSEN, 1992; RILEM RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000) e a primeira proposta nacional elaborada por LIMA (1999). A recomendação BCSJ¹² é a mais antiga (HANSEN, 1992). A recomendação holandesa é importante por conter resultados de pesquisas experimentais realizados na década de 80 (HENDRIKS, 2000). Já a da RILEM é resultado de um conjunto de pesquisas realizadas na Europa, Estados Unidos e Japão (RILEM RECOMMENDATION, 1994).

A única dessas recomendações que prevê a produção de concretos com resistência mecânica acima de 20 MPa é a da RILEM (RILEM RECOMMENDATION, 1994). Isso é admitido em duas situações diferentes, desde que atendidos os demais critérios: a) através da utilização de resíduos de concreto triados como agregados graúdos para a produção de concretos com resistência de até 60 MPa; e b) através do emprego de misturas de agregados graúdos de RCD reciclados com naturais até o limite de 20%, dependendo da origem da fração mineral, para a produção de qualquer tipo de concreto. A segunda situação também é admitida pela proposta de normalização espanhola (ALAEJOS *et al.*, 2004), por HENDRIKS (2000) e pela norma inglesa (REID, 2003).

As recomendações da B.S.C.J. (HANSEN, 1992), no Japão, e de LIMA (LIMA, 1999), no Brasil, são mais conservadoras, especialmente por limitar a resistência mecânica dos concretos a 18 MPa quando utilizados agregados provenientes de resíduos de concreto; no entanto, no caso brasileiro, consideram o uso da fração miúda desses agregados diferentemente da recomendação da RILEM, que considera essa fração muito porosa e contaminada.

Elas também restringem as aplicações dos concretos a situações nas quais a influência da porosidade na durabilidade dos concretos é reduzida, assim como os

¹² Building Contractors Society of Japan.

concretos produzidos com resíduos de alvenaria nas recomendações holandesa e da RILEM.

Tabela 3.3 Recomendações para uso de agregados graúdos de RCD reciclados em concretos (ANGULO; JOHN, 2002b; ANGULO; JOHN, 2004).

Exigências	BSCJ	Holanda		RILEM		LIMA (1999)	
Max fck (MPa)	18	nd	nd	50 a 60	16 a 20	16	12
Natureza do agregado	Concreto	Concreto	Alvenaria ₂	Concreto	Alvenaria	Concreto	Alvenaria
Condições de Exposição			Pouca umidade	Classes de exposição (ENV 206)		Sem presença de umidade	
				2, 3 e 4	1		
Aplicação	fundações edifícios comerciais térreos	Sem restrição		Sem restrição		Contrapiso bases vergas blocos	Contrapiso bases vergas blocos
Massa Esp. > (kg/m³)	2.200	2.100	nd	2.000	1.500	nd	nd
Absorção < (% em massa)	7	nd	nd	10	20	7	12
passante # 0,075 mm < (% em massa)	1	0,1	2	2	3	nd	nd
Teores de fases ⁵ < (em massa)	A (10 kg/m³ ou 0,77% ⁴) (d <1,95 kg/dm³)	5% de outras	A (25%) CE (20%) ³	10% d< 2,2 kg/dm³. 1 % de outras	10% d<1,8 kg/dm³	A (10%) CE (5%)	A (50%) CE(50%)
Max de ¹ contaminante s (em massa)	2 kg/m³ ou 1% ⁴	1% betume 0,5 % outros	1	1	5	1 solo (5%)	1 solo (5%)
Teor de sulfatos (% em massa)			1 (NEN 5930)	1 (BS 812)	1 (BS812)		
Expansão por reação álcali-agregado				Regulam nacionais	Regulam. nacionais		
Outros			Cloretos (NEN 5921)	“deicing salt test”			

¹ Contaminantes são materiais betuminosos, madeira, vidro e outros que não fases, como concretos, argamassas e cerâmicas.

² É possível que se trate de alvenaria com blocos de concreto.

³ Uma razão para a limitação podem ser ciclos de gelo-degelo em materiais cerâmicos conforme contato pessoal com o pesquisador Johan Put da Universidade de Delft, Holanda.

⁴ Cálculo realizado considerando-se a massa unitária dos agregados graúdos de RCD reciclados como 1.300 kg/m³.

⁵ A significa fase argamassa e CE significa fase cerâmica.

São estabelecidos valores limites para massa específica aparente e absorção de água dos agregados de RCD reciclados. Embora esses limites sejam semelhantes para os agregados de concreto reciclados, os valores potenciais de resistência são muito diferentes. Assim, elas não estabelecem uma relação clara entre resistência mecânica dos concretos e a porosidade nesses agregados.

Os teores máximos admissíveis de finos (menores que 75 μm) nesses agregados não são críticos nessas recomendações. No caso brasileiro, eles são admitidos como solo e os teores devem ser inferiores a 5%. Não se pode inferir se esse é um limite aceitável na presença de argilominerais micáceos (SMITH; COLLIS, 1993), expansivos na presença de água.

As recomendações da Holanda (HENDRIKS, 2000), da B.S.C.J. (HANSEN, 1992) e de LIMA (LIMA, 1999) controlam as fases presentes nos agregados de concreto e de alvenaria reciclados, enquanto que a da RILEM controla os teores de massa abaixo de uma densidade determinada por uma separação empregando líquidos densos.

Outros critérios relevantes devem ser considerados como: a) pré-saturação dos agregados de concreto reciclados para reduzir as perdas de abatimento nos concretos (KASAI, 1994); e b) frequência de realização dos ensaios de caracterização nos agregados de RCD reciclados (MEHUS *et al.*, 2003).

Posteriormente, o Comitê Alemão do Concreto Armado recomendou o uso da fração miúda dos agregados de concreto reciclados misturados com agregados naturais para a produção de concretos, limitando a resistência mecânica do concreto até 35 MPa (GRUBL; RUHL, 1998)

3.2.2 Normas técnicas

Foram detectadas normas técnicas para o uso de agregados de RCD reciclados em concreto em países como Dinamarca, Holanda (HENDRIKS, 2000; HENDRIKS; JANSSEN, 2001), Alemanha (DIN, 2002), na Inglaterra (REID, 2003) e no Brasil (ABNT, 2004). A Tabela 3.4 resume os requisitos de algumas dessas normas.

Tabela 3.4 Requisitos de algumas normas técnicas para uso dos agregados de RCD reciclados em concretos (HENDRIKS, 2000; DIN, 2002; MULLER, 2004; ABNT, 2004).

Exigências	Holanda (NEN 5905)		Alemanha (DIN 4226-100)				Brasil (NBR 15.116)	
Natureza do agregado	CO	MI	CO	RED	AL	MI	CO	MI
Aplicação	LA < 40	LA < 50	Atender requisitos específicos				Atender requisitos específicos	
Fases ¹³ (% massa) CO+RO	> 90	> 50	> 90	> 70	< 20	> 80	> 90 ²	< 90
Fases (% massa) TCEC	< 10	< 50	< 10	< 30	> 80		< 10	> 10
Fases (% massa) BSC					< 5	< 20		
Fases (% massa) CEP,AR,CC					< 2	< 3		
Fases (% massa) Betume	< 1,0	< 1,0	< 1	< 1	< 1	< 20	< 3	< 3
Fases (% massa) V, GE, P, ME, MA	(% vol)	(% vol)	< 0,2	< 0,5	< 0,5	< 1,0		
Sulfatos (% em massa)	< 1,0		< 0,8				-	< 1,0 ⁴
Cloretos (% em massa)			< 0,04 ³				< 0,15	< 1,0 ⁵
MEA ⁶ (kg/m ³) >	nd	nd	2.000	2.000	1.800	1.500	nd	nd
ABS ⁶ (%) <	nd	nd	10	15	20	-	7 (G ⁷) 12 (M)	12 (G) 17 (M)
Fração < # 75 µm (% em massa)	3 (A > 4 mm) 4 (A 0-4 mm) 10 (A 0-1 mm)		DIN 4226-1				10 (G) 15 (M)	10 (G) 20 (M)
Outros	PL < 40 (NEN 5935) Carbonatos < 40 (NEN 5922)						Pré-saturação dos agregados Resistência de 10-15 MPa ⁸	

¹ Legenda da composição das fases: CI – cimentícia; RO – rocha; CO – concreto; TCEC – tijolos cerâmicos e cimentícios pouco porosos; BSC – blocos sílico-calcários; CEP – cerâmica porosa; AR – argamassa; CC – concreto celular; V – vidro; GE - gesso; P- plástico; ME - metal; MA- madeira.

² Na especificação brasileira, não se diferencia fase concreto e argamassa. As duas são consideradas como cimentícias.

³ Método da catação aplicado somente na fração graúda tanto no Brasil como na Alemanha. Na norma DIN, admite-se que dentro de um mesmo lote a composição da fração graúda é igual a da fração miúda.

⁴ A norma brasileira mede sulfatos solúveis em água enquanto que a norma alemã mede sulfatos solúveis em ácido.

⁵ A norma brasileira mede cloretos solúveis em água enquanto que a norma alemã mede cloretos solúveis em ácido.

⁶ MEA significa massa específica aparente e ABS significa absorção de água. Na especificação alemã, a absorção de água é determinada após saturação de 10 minutos em vez de 24 horas da norma brasileira.

⁷ G significa fração graúda e M significa fração miúda dos agregados de RCD reciclados.

⁸ A norma brasileira não exige teste de reatividade álcali-silica por considerar que concretos com resistência mecânica de até 15 MPa são suficientemente porosos para acomodar, caso presente, os produtos expansivos dentro da matriz cimentícia. Ela não faz menção aos outros aspectos de durabilidade dos concretos, admitindo que os componentes à base de cimento devem atender aos critérios de desempenho da cada aplicação específica.

A norma brasileira é mais conservadora e só recomenda o emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos com resistência mecânica de até 15 MPa.

As demais normas admitem o uso em concretos com resistência acima de 25 MPa. Diferentemente das demais normas, a norma holandesa especifica valores de abrasão independente da aplicação requerida. O uso da fração miúda dos agregados de RCD reciclados está previsto na Holanda, na Alemanha e no Brasil.

Todas as normas analisadas exigem a classificação da fração mineral do RCD em resíduos de concreto, de alvenaria ou mistos, além de controlar os teores das fases presentes na fração graúda dos agregados de RCD reciclados. A especificação alemã é a única que separa a fase cerâmica em duas classes diferentes: porosa e não porosa. Já a norma brasileira não separa concreto e argamassa em duas fases pela dificuldade de distinção pela visão através da catação, sendo uma única fase chamada cimentícia.

A norma brasileira adotou teores máximos admissíveis de sulfatos e cloretos semelhantes às normas internacionais. No entanto o método brasileiro determina essa fração solúvel em água, enquanto que o método alemão analisa essa fração em meio ácido. Ela não controla a reatividade potencial álcali-sílica para concretos com resistência mecânica de até 15 MPa, por considerá-los suficientemente porosos para acomodar os produtos expansivos dentro da matriz cimentícia, sem fissurar ou afetar as propriedades mecânicas.

Diferentemente das especificações estrangeiras, a norma brasileira é menos restritiva quanto ao teor de finos presentes nos agregados de RCD reciclados, por considerar interessante na fabricação de determinados produtos cimentícios pré-fabricados que geralmente empregam a fração fina dos resíduos de pedreiras. Isso está alinhado com as práticas correntes no mercado e as revisões de normas para agregados naturais. Entretanto, para limitar o teor de argilominerais presentes nos solos que eventualmente se misturam no processo de reciclagem, os torrões de argilas presentes nesses agregados estão limitados em 2% em massa.

Quanto às propriedades físicas dos agregados, a especificação alemã limita os valores de massa específica aparente bem como os valores de absorção de água. Já na especificação brasileira, como as propriedades massa específica aparente e absorção

de água são variáveis dependentes, conforme ilustrado na Figura 3.13, selecionou-se a propriedade na qual o método de caracterização era mais simples.

Figura 3.13 Correlação entre as propriedades massa específica aparente e absorção de água para as fases dos agregados graúdos de RCD reciclados obtidos na usina de reciclagem de Santo André – São Paulo (dados de ANGULO, 2000).

3.2.3 Dificuldades na aplicação das normas técnicas em usinas de reciclagem

A classificação da fração mineral do RCD conforme as normas técnicas não é algo simples, pois pode resultar em agregados reciclados com propriedades físicas variáveis.

Na Espanha, um estudo analisou os agregados graúdos obtidos a partir de 15 diferentes lotes de resíduos de concreto (ALAEJOS; SÁNCHEZ, 2004). A resistência à compressão de corpos-de-prova extraídos desses lotes variou de 10,2 a 53,3 MPa. Além disso, os teores de outras fases presentes nesses agregados reciclados variaram de 0,4 a 17 % da massa. Isso demonstra que essa classificação é imprecisa, resultando em agregados com absorção de água entre 4,9 e 9,7% e massa específica aparente entre 2,09 a 2,40 kg/dm³.

Na Alemanha, MÜLLER (2003) investigou a composição e propriedades físicas dos agregados reciclados obtidos da triagem dos resíduos de alvenaria em dez usinas de reciclagem diferentes. A Tabela 3.5 mostra que os teores de concreto variaram de 0 a 60% acompanhado de uma variação nos teores de argamassa de

cerâmica porosa de 0 a 50% nos agregados de alvenaria reciclados, resultando numa variação nos valores de massa específica aparente de 1,88 a 2,22 kg/dm³.

Tabela 3.5 Variabilidade na composição de fases e nas propriedades físicas dos agregados de RCD reciclados obtidos a partir dos resíduos de alvenaria (dados de MULLER, 2003).

	Fases da composição (%)					MEA (kg/dm ³)
	CO+R	TCEC	BSC	CEP+AR+CC	V+ G+ P+ ME+MA	
Máximo	60	80	10	50	nd	2,22
Mínimo	0	35	0	0	nd	1,49
Média	25	45	5	22	0,83	1,88

MEA significa massa específica aparente.

CO + R – fase concreto + rocha.

TCEC – fase tijolos cerâmicos e cimentícios pouco porosos.

BSC – bloco sílico-calcáreo.

CEP+AR+CC – cerâmica porosa, argamassa e concreto celular.

No Brasil, não se realiza esse tipo de classificação da fração mineral do RCD, encontrando-se tipicamente um resíduo misto de concreto de alvenaria. A Figura 3.14 mostra a variabilidade da composição das fases e das propriedades físicas dos agregados graúdos de RCD reciclados obtidos de uma usina piloto de reciclagem na cidade de Santo André, estado de São Paulo, conforme dados de ANGULO (2000). ANGULO e JOHN (2002b) confrontaram os resultados dessa caracterização com as recomendações japonesa e holandesa disponíveis na Tabela 3.3, com exceção da recomendação da RILEM que prevê o uso de líquidos densos para cortes em valores específicos de densidade.

Nenhum dos lotes de agregados graúdos de RCD reciclados atendeu aos valores das propriedades especificadas para uso em concretos com resistência superior a 25 MPa, principalmente em função da presença de argamassas, cerâmicas e materiais não minerais. Aproximadamente 50% dos lotes de agregados analisados poderiam, no entanto, ser utilizados em concretos sem função estrutural (inferior a 25 MPa).

(a)

(b)

(c)

Figura 3.14 Variabilidade dos agregados graúdos de RCD misto reciclados em função de caçambas processadas. Ponto: dentro de uma mesma caçamba e Linha – entre as caçambas. (a) fases da composição (catação), (b) absorção de água e (c) massa específica aparente (ANGULO *et al.*, 2003c; JOHN; ANGULO, 2003).

Assim, conclui-se que as classificações do RCD mineral como resíduos de concreto, de alvenaria ou mistos não garantem agregados reciclados com composição e propriedades físicas constantes, o que dificulta sua inserção no mercado de agregados.

Por outro lado, a catação que é o método visual de controle de fases dos agregados graúdos de RCD reciclados utilizados nas normas técnicas, é trabalhosa, demorada (ANGULO, 2000), subjetiva (HENDRIKS, 2000; SANT'AGOSTINO;

KAHN, 1997), e sujeita a erro por desatenção ou fadiga, apesar de sua simplicidade. Além disso, na realidade nacional, as fases presentes nos agregados graúdos de RCD reciclados apresentam significativa variação nos valores de absorção de água conforme a Figura 3.15 (ANGULO *et al.*, 2003c; JOHN; ANGULO, 2003).

Figura 3.15 Variabilidade da absorção de água, frequência relativa, das fases identificadas a partir do método de catação: a) cimentícias, b) cerâmica vermelha e c) rochas em agregados graúdos de RCD reciclados nacionais (ANGULO *et al.*, 2003c; JOHN; ANGULO, 2003).

A porosidade, que é uma propriedade que está intimamente relacionada com as propriedades físicas dos agregados, pode ser um critério mais interessante, por influenciar a resistência mecânica e durabilidade dos concretos (CALLISTER, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 1994; LIMBACHIA *et al.*, 2000; WIRQUIN *et al.*, 2000).

Isso é adotado na especificação da RILEM que controla os teores de massa abaixo de uma densidade determinada pela separação por líquidos densos.

3.3 Conclusões do capítulo

As usinas nacionais de reciclagem da fração mineral do RCD como agregados são compostas basicamente por operações de cominuição e de separação por tamanho. A catação manual pode resultar em agregados graúdos de RCD reciclados com teores de materiais não-minerais de até 3,5% da massa. Elas são diferentes das usinas estrangeiras no arranjo das operações unitárias e no emprego de operações de concentração da fração mais leve presente nos agregados de RCD reciclados, inclusive via úmida, como os jigsawes.

A classificação da fração mineral do RCD proposta pelas normas técnicas resulta em agregados reciclados com composição e propriedades físicas variáveis. Além disso, na realidade nacional, as fases classificadas visualmente pela catação nos agregados de RCD reciclados também apresentam propriedades físicas variáveis.

A separação por densidade pode ser um critério mais interessante por se relacionar com as propriedades físicas dos agregados de RCD reciclados, sua porosidade, e resistência mecânica e durabilidade dos concretos. Além disso, existem equipamentos industriais que podem realizar esse tipo de separação.

4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS

Uma caracterização detalhada que considere a identificação da natureza química e mineralógica de um resíduo é fundamental para se definir uma reciclagem eficiente do ponto de vista técnico, econômico e ambiental (JOHN *et al.*, 2003; JOHN; ANGULO, 2003).

A quantificação visual das fases presentes nos agregados de RCD reciclados fornece pouca informação sobre a sua composição química e mineralógica. Além disso, não se conhece em detalhe como os grupos de materiais presentes nestes agregados estão associados. Pode-se supor que a dureza dos materiais irá certamente alterar a distribuição das espécies químicas e fases minerais ou cristalinas ao longo das frações granulométricas.

Assim, o objetivo deste capítulo é analisar a composição química e mineralógica nas diferentes frações granulométricas de amostras representativas de agregados, provenientes de duas usinas de reciclagem da fração mineral do RCD do Estado de São Paulo.

4.1 Programa experimental, materiais e métodos

4.1.1 Coleta de amostras representativas

Foram coletadas amostras representativas de agregados de duas usinas de reciclagem da fração mineral do RCD: a) uma localizada em Itaquera (Região Metropolitana de São Paulo), com cominuição por britador de impacto (capacidade de 100 t/h); e b) outra localizada em Vinhedo, com cominuição por britador de mandíbulas (capacidade de 8 t/h). Ambas estão situadas no Estado de São Paulo, sendo que as informações detalhadas das mesmas estão disponíveis no Apêndice A.

Essas usinas distinguem dois tipos de produtos segundo prática corrente no Brasil: a) Cinza – produto com predominância visual de materiais à base de cimento e b) Vermelho – produto com predominância visual de materiais cerâmicos (vermelha ou branca), solos e outros, o que definiu a coleta de três tipos de agregados de RCD reciclados: IT C (Itaquera Cinza), IT V (Itaquera Vermelho) e VI V (Vinhedo Vermelho).

A massa representativa de cada tipo de agregado (1 cinza e 2 vermelhos) foi definida a partir da teoria de Pierre Gy (PITARD, 1993; GOES *et al.*, 1998), com amostragem mínima de aproximadamente 1.630 kg, considerando as premissas apresentadas no Apêndice A. A cada dia de produção, foram coletadas na saída do transportador de correia (antes do peneiramento) 4 latas de 18L, uma no início dos trabalhos, outra no final e duas em momentos intermediários, igualmente espaçados no tempo. Tipicamente, este procedimento resultou na coleta de 1 lata a cada hora de operação, uma vez que as instalações operam aproximadamente 4 horas por dia. Este método de amostragem é conhecido como sistemático com incrementos coletados em intervalos regulares (LUZ *et al.*, 1998).

Ao final de cada dia de produção, o responsável pela coleta distribuía as latas coletadas, de maneira uniforme e ininterrupta ao longo de uma pilha alongada com seção triangular, em camadas sucessivas e em direções alternadas conforme procedimento exposto na Figura 4.1.

Figura 4.1 Procedimento de formação da pilha alongada.

Ao final de 20 dias de produção, a massa de agregados coletada de cada pilha foi de aproximadamente 1,8 t¹³. Durante esse período, foi estimada uma produção de 8.000 t em Itaquera e de 1.040 t em Vinhedo (Apêndice A). Assim, a massa de

¹³ 1440 dm³ de cada tipo de RCD mineral e com massa unitária estimada de 1,3 kg/dm³ (ZORDAN, 1997).

agregados representou aproximadamente 0,02% (kg/kg) do total produzido em Itaquera e 0,18% (m/m) em Vinhedo.

Ao final da execução de cada pilha, as extremidades desta foram retomadas e redistribuídas seguindo o mesmo procedimento de formação da pilha. Em seguida, quatro alíquotas de aproximadamente 65 kg (260 kg no total) foram retiradas e armazenadas em laboratório (Figura 4.2). Estas alíquotas representavam em torno de 14% (kg/kg) do produto amostrado em cada pilha.

Figura 4.2 Recorte e redistribuição das extremidades da pilha alongada (a) e retirada das alíquotas (b).

A seguir, as alíquotas de cada tipo de agregado foram novamente homogeneizadas em laboratório, através de pilha alongada, seguindo o mesmo procedimento, e a quarta parte (em volume) foi encaminhada para os ensaios de caracterização (Figura 4.3).

Figura 4.3 Pilha alongada do VI V (a). A alíquota foi retirada dentre os pontos marcados pelos separadores (b).

4.1.2 Análise granulométrica dos agregados e britagem

As amostras representativas de agregados de RCD reciclados foram classificadas em diversas frações granulométricas de acordo com a norma NBR 7.217 (ABNT, 1987b). As frações maiores que a peneira de abertura de malha de 25,4 mm são atualmente pouco utilizadas como agregados graúdos para concretos. Assim, neste estudo, todo o material retido em peneira de 25,4 mm de abertura foi reprocessado em britador de mandíbula de laboratório (marca FURLAN, modelo BM 2010, 7,5CV/380 rpm) até 100% passante em 25,4 mm. Para isso, fixou-se a abertura da mandíbula do britador em 25,4 mm inclusive com o objetivo de se reduzir a geração de finos (partículas menores que 75 μ m).

As frações granulométricas menores que 25,4 mm foram denominadas Tal Qual (TQ), já as frações granulométricas maiores que 25,4, após a etapa de rebritagem a 25,4 mm, foram denominadas Britadas (B).

As frações granulométricas TQ e B foram classificadas em peneiras com aberturas de malha (em mm): 19,1; 12,7; 9,5; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15. Desta forma, foram obtidas as frações (em mm): -25,4+19,1; -19,1+12,7; -12,7+9,5; -9,5+4,8; -4,8+2,4; -2,4+1,2; -1,2+0,6; -0,6+0,3; -0,3+0,15; -0,15. Nos intervalos, “-” significa passante enquanto que “+” significa retida.

Figura 4.4 Formação das frações granulométricas TQ e B.

Os agregados provenientes de Itaquera (IT C e IT V) foram peneirados a seco e os agregados provenientes de Vinhedo (VI V) peneirados a úmido com o objetivo de se reduzir o teor de finos (partículas menores que 0,075 mm) aderidos nas frações granulométricas, que era elevado nessa amostra. O peneiramento a seco foi realizado em peneirador marca Produtest num conjunto de três peneiras quadradas em cada etapa, de dimensões 50 x 50 x 10 cm, com tela em aço inox, e aberturas de malha (em mm) de 25,4; 19,1; 12,7; 9,5; 4,8; 2,4; 1,2 e 0,6. A seguir, a fração passante em peneira de abertura de malha 0,6 mm foi amostrada com tomada de uma alíquota de 2,0 kg através de pilha alongada para continuidade do peneiramento em peneiras circulares de 20 cm de diâmetro. Já o peneiramento a úmido foi realizado nas mesmas peneiras quadradas de dimensões 50 x 50 x 10 cm incluindo as peneiras 0,3 e 0,15 mm com água abundante e com saída de água num fundo de peneira adaptado para recuperar e recircular a água conforme a Figura 4.5.

(a)

(b)

Figura 4.5 Peneiramento a úmido: (a) fundo adaptado e (b) recuperação da água no balde para recirculação.

4.1.3 Preparação das amostras para análises químicas e mineralógicas

As frações granulométricas TQ e B foram amostradas através de amostrador Jones em alíquotas que representavam aproximadamente 1/8 da massa total. Essas alíquotas foram cominuídas abaixo de 1 mm através de britador de rolos, marca *Eberle* modelo *S90L4* (Figura 4.6), em preparação para as análises químicas, mineralógicas e termogravimétricas.

Figura 4.6 Britador de rolos, marca Eberle, modelo S90L4.

As frações assim obtidas foram reamostradas e pulverizadas em moinhos de discos oscilantes de ferro-cromo, Herzog HSM 250P, apresentado na Figura 4.7 até redução do tamanho das partículas menores que 20 μm para a análise quantitativa por fluorescência de raios X, por ataque ácido e por termogravimetria.

Figura 4.7 Moinho de discos oscilantes, Herzog HSM 250P.

As alíquotas remanescentes foram pulverizadas em moinho planetário, recipiente com cargas de bolas de ferro-cromo, até redução do tamanho das partículas abaixo de 37 μm para a análise por difração de raios X através do método do pó (SANTOS, 1975).

4.1.4 Análise química por FRX

A técnica de caracterização da composição química por FRX foi escolhida pela rapidez, baixo custo e facilidade de execução se comparada com os métodos tradicionais de análise química por via úmida. Como as espécies químicas podem

variar em função do tamanho das partículas, optou-se, preliminarmente, por não juntar as frações granulométricas TQ (superiores a 25,4 mm) e B (inferiores a 25,4 mm).

Foram assim analisadas 20 frações granulométricas (TQ e B) para cada tipo e natureza de agregado de RCD reciclado (IT C, IT V e VI V), num total de 60 análises. Análises quantitativas pela técnica de fluorescência de raios X foram realizadas a partir de amostras fundidas na proporção amostra:fundente (Spectromelt A10-marca Merck), em massa, de 1:7, em cadinhos e moldes de platina:ouro, utilizando máquina de fusão “Claisse” na temperatura da ordem de 1.100 °C. As pastilhas fundidas foram lidas diretamente no espectrômetro MagixPro, marca PANalytical, utilizando curvas de calibração com suporte de amostras de referência internacionais existentes no Laboratório de Caracterização Tecnológica, do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Desta forma, os teores dos onze óxidos de maior abundância foram determinados: SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO, TiO₂, P₂O₅ e SO₃. Paralelamente, as perdas ao fogo foram determinadas em alíquotas de 1g na temperatura de 1.100° C em forno mufla, marca Vulcan, modelo NDI3-550, pelo período de 1 hora (RATTI, 1994).

4.1.5 Seleção das frações granulométricas para as demais análises

Observou-se que a composição química variou tipicamente em três intervalos granulométricos: fração graúda (-25,4+4,8 mm), fração miúda (-2,4+0,15 mm) e fração fina (- 0,15 mm). Para reduzir o número de análises, foram selecionadas frações granulométricas TQ e B de IT C, IT V e VI V desses intervalos, conforme a Tabela 4.1 para as análises mineralógicas, análises químicas por ataque ácido e termogravimetria.

Tabela 4.1 Frações granulométricas TQ e B de IT C, IT V e VI V selecionadas.

Fração granulométrica (mm)	IT C	IT V	VI V
Graúda	-9,5+4,8	-25,4+19,1	-19,1+12,7
Miúda	-0,6+0,3	-1,2+0,6	-2,4+1,2
Fina	-0,15	-0,15	-0,15

As alíquotas pulverizadas TQ e B foram homogeneizadas por pilhas alongadas e compostas, respectivamente, por ponderação de massa, com massas finais de aproximadamente 100 g para os diversos ensaios consecutivos e suas repetições.

4.1.6 Análise mineralógica por DRX

A análise mineralógica foi realizada nas frações granulométricas selecionadas por difração de raios X, por meio do método do pó (10 g das alíquotas) em difratômetro MPD 1880, marca Philips, com tubo de cobre ($\text{CuK}\alpha$) e foco largo em condições de 40 kV e 50 mA. A faixa angular de operação foi de 2,5 a 80° 2 θ , com passo 2 θ de 0,02°, e o tempo de 1 segundo por passo.

As fases cristalinas foram identificadas através do programa X'Pert Highscore da Philips, utilizando o banco de dados PDF-2 do “International Centre for Diffraction Data” (ICDD) com base de dados atualizada até 1996.

4.1.7 Termogravimetria - antes e após o ataque com HCl 33%

O objetivo da termogravimetria foi identificar a contribuição dos aglomerantes e dos argilominerais na perda ao fogo, nas frações granulométricas selecionadas, antes e, no resíduo insolúvel, após o ataque com HCl 33%, realizado para estimar o teor de aglomerantes. Ela foi determinada nas alíquotas pulverizadas de aproximadamente 1.000 mg, sem repetições, empregando equipamento marca NETSZCH, modelo TG 209-C, com taxa de aquecimento de 10° C/min, até a temperatura de 1.000 °C, exposta à temperatura ambiente, e fluxo de gás nitrogênio de 30 ml/min.

4.1.8 Estimativa dos teores de aglomerantes

Foi desenvolvido um método na pesquisa para estimar os teores dos aglomerantes nas frações granulométricas selecionadas, através do ataque em solução de HCl 33%, obtidos pela média de duas determinações em alíquotas pulverizadas de aproximadamente 2,5g. Esse ataque é eficiente para separar os argilominerais (GRIM, 1953), quartzo e feldspatos, insolúveis, dos aglomerantes, solúveis (QUARCIONI, 1998). O resíduo deste ataque foi seco a 100°C para não

incluir a água de constituição dos argilominerais por meio da calcinação do resíduo a 1.000°C. O teor de aglomerantes foi determinado a partir da equação 4.1.

$$A(\%) = 1 - RI_{100^{\circ}C}(\%) \quad (\text{eq. 4.1}).$$

em que:

A – é o teor estimado, expresso em %, dos aglomerantes; e

$RI_{100^{\circ}C}$ – é o resíduo insolúvel do ataque por solução de HCl seco a 100°C, expresso em %, em relação à massa da alíquota inicial.

Esse método é válido quando agregados ou rochas solúveis em ácido não estão presentes nesses agregados, como, por exemplo, os de origem calcária. Caso presentes, esses teores não devem ser superiores a 1/3 dos teores dos aglomerantes por apresentar erros relativos de determinação superiores a 33%.

Na presença de teores acima de 10%, o erro relativo da determinação pode alcançar 50 %.

4.1.9 Estimativa dos teores de argilominerais

A água de constituição dos argilominerais foi expressa, em porcentagem, a partir da equação 4.2.

$$H_2O_{AR}(\%) = \Delta massa_{150-1000^{\circ}C}(\%) \quad (\text{eq. 4.2})$$

em que:

H_2O_{AR} – é o teor, expresso em %, da água de constituição dos argilominerais.

$\Delta massa_{150-1000^{\circ}C}$ – é a perda de massa, expressa em %, entre 150 °C e 1.000°C, determinada pela análise termogravimétrica no resíduo insolúvel do ataque com HCl, seco a 100 °C.

Como a água de constituição dos argilominerais é parte constituinte da estrutura cristalina das fases minerais, os teores dos tipos de argilominerais identificados pela DRX foram estimados a partir de uma relação constante entre a

água de constituição dos argilominerais e o resíduo da perda ao fogo, conforme a equação 4.3 (SANTOS, 1975),

$$AR = \frac{H_2O_{AR}}{K} \text{ (eq. 4.3)}$$

em que:

H_2O_{AR} – é o teor, expresso em %, da água de constituição dos argilominerais.

K é uma constante estequiométrica de valor 0,14 para caulinita, 0,04 para muscovita (SANTOS, 1975; KLEIN; HURLBURT, 1993), 0,05-0,08 para a flogopita e 0,08-0,09 para illita (BETEJTIN, 1970). Foi adotada a mediana de 0,09 para a mistura de desses argilominerais.

O complemento da soma dos teores dos aglomerantes e dos argilominerais é atribuído às rochas (quartzo, feldspatos) e cerâmica.

O Apêndice B apresenta o fluxograma com os procedimentos empregados para a determinação dos aglomerantes e dos argilominerais presentes nos agregados de RCD reciclados.

4.1.10 Análise estatística

A normalidade dos resultados foi verificada pelo método de Anderson-Darling. A distribuição dos resultados foi analisada a partir do gráfico de boxes, sendo a análise de variância empregada para identificar a diferença estatística significativa entre as médias das distribuições. Quando necessária, a comparação múltipla de médias foi aplicada para identificar quais entre as distribuições que apresentavam essa diferença pelo método de Fisher (MONTGOMERY, 1997).

4.2 Distribuição granulométrica

A Figura 4.8 mostra as distribuições passantes acumuladas dos agregados de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V. Os agregados de RCD reciclados de Itaquerá (IT C e IT V) apresentam maior quantidade de massa na fração miúda (menor que 4,8 mm) que o de Vinhedo (VI V).

Figura 4.8 Distribuições passantes acumuladas dos agregados de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V.

As frações granulométricas maiores que 25,4 mm representam aproximadamente 20% da massa para os agregados de RCD reciclados de Itaquera (IT C e IT V) e 45% da massa para os agregados de RCD reciclados de Vinhedo (VI V). Elas foram, portanto, reprocessadas. A fração miúda (menor que 4,8 mm) representa em torno de 40% da massa dos agregados de RCD reciclados. Embora essa fração não seja comumente utilizada em concretos, dada a magnitude, considera-se que o seu uso é fundamental para a viabilidade técnica das usinas de reciclagem da fração mineral do RCD.

A Figura 4.9 mostra as distribuições passantes acumuladas da fração graúda dos agregados de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V após a cominuição abaixo de 25,4 mm. As distribuições granulométricas do tipo B são distintas das do tipo TQ. Quando ponderadas com TQ, elas se ajustam melhor aos limites da ABNT. Houve pouca influência do tipo de britador ou estágios de cominuição na distribuição granulométrica dos agregados miúdos de RCD reciclados.

Figura 4.9 Distribuições passantes acumuladas dos agregados graúdos TQ e B de IT V (a), IT C (b) e VI V (c) após a britagem e especificação de produto brita 1 da ABNT.

4.3 Resultados da análise química por FRX

4.3.1 Itaquera vermelho

A Tabela 4.2 e a Tabela 4.3 apresentam os teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas TQ e B, respectivamente, do agregado de RCD reciclado de IT V.

Tabela 4.2 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas TQ do agregado de RCD reciclado de IT V.

Fração (mm)	Massa (%)	Teores dos óxidos (% em massa)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF	Total
-25,4+19,1	6,8	68,4	11,2	5,8	3,3	0,9	1,7	3,2	0,4	<0,1	0,2	4,9	100,0
-19,1+12,7	9,1	68,7	11,0	5,7	3,2	1,1	1,8	3,0	0,4	0,1	0,3	3,6	99,0
-12,7+9,5	5,7	66,3	10,5	6,9	3,4	1,3	1,4	2,7	0,4	0,1	0,2	6,3	99,4
-9,5+4,8	11,6	65,5	9,7	8,2	3,4	1,0	0,9	2,8	0,5	0,1	0,2	7,3	99,7
-4,8+2,4	9,8	67,6	8,5	9,3	2,5	1,4	0,9	2,5	0,3	<0,1	<0,1	7,5	100,7
-2,4+1,2	8,4	68,6	8,8	6,4	3,2	0,8	0,5	2,2	0,5	<0,1	0,3	8,0	99,3
-1,2+0,6	9,4	71,7	7,7	5,0	2,7	0,8	0,3	1,6	0,4	<0,1	0,2	7,5	97,8
-0,6+0,3	7,8	71,8	7,6	4,9	2,9	0,7	0,2	1,5	0,4	<0,1	<0,1	7,7	97,8
-0,3+0,15	6,0	65,8	9,8	6,2	3,3	1,0	0,3	1,7	0,7	<0,1	0,1	9,3	98,3
-0,15	4,4	48,6	13,5	10,2	4,4	1,7	0,5	1,8	0,8	0,1	<0,1	19,1	100,8
MP		66,9	9,3	7,3	3,2	1,1	0,9	2,4	0,5	0,1	0,2	7,7	-
Max		71,8	13,5	10,2	4,4	1,7	1,9	3,2	0,8	0,2	0,3	19,1	-
Min		48,6	7,6	4,9	2,5	0,8	0,2	1,5	0,3	0,0	0,0	3,6	-

MP significa média ponderada pela massa.

Nos cálculos, os valores (< 0,10) foram considerados como zero.

Tabela 4.3 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas B do agregado de RCD reciclado de IT V.

Fração (mm)	Massa (%)	Teores dos óxidos (% em massa)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF	Total
-25,4+19,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-19,1+12,7	3,4	68,5	8,1	8,6	3,5	1,4	0,8	2,3	0,4	<0,1	0,3	7,0	100,9
-12,7+9,5	6,0	64,3	9,6	9,4	3,2	1,9	1,3	2,5	0,4	0,1	0,3	7,7	100,9
-9,5+4,8	5,4	65,7	8,3	9,9	3,0	1,4	0,9	2,5	0,4	0,1	0,3	8,0	100,5
-4,8+2,4	2,0	63,7	9,7	7,1	3,4	1,0	0,8	2,5	0,5	<0,1	0,4	9,2	98,3
-2,4+1,2	1,2	69,1	7,5	8,9	2,7	1,2	0,7	2,3	0,3	<0,1	0,1	7,5	100,3
-1,2+0,6	0,9	71,1	6,0	8,4	3,1	1,2	0,5	1,8	0,2	<0,1	<0,1	7,8	100,2
-0,6+0,3	0,8	70,1	5,3	8,5	3,8	1,3	0,3	1,7	0,3	<0,1	<0,1	9,0	100,4
-0,3+0,15	0,6	65,2	6,6	11,3	3,1	1,7	0,5	1,9	0,4	<0,1	<0,1	10,2	101,0
-0,15	0,6	46,0	8,8	17,5	3,4	2,3	0,6	2,1	0,5	0,2	<0,1	19,6	101,0
MP		65,6	8,5	9,3	3,2	1,5	0,9	2,4	0,4	0,1	0,3	8,3	-
Max		71,1	9,7	17,5	3,8	2,3	1,3	2,5	0,5	0,2	0,4	19,6	-
Min		46,0	5,3	7,1	2,7	1,0	0,3	1,7	0,2	0,0	0,0	7,0	-

MP significa média ponderada pela massa.

Nos cálculos, os valores (< 0,10) foram considerados como zero.

Após rebitagem, não foi detectada massa na fração granulométrica -25,4+19,1 mm.

Os teores médios ponderados dos óxidos principais (SiO₂, Al₂O₃, CaO) e da perda ao fogo das frações TQ e B do agregado de RCD reciclado de IT V são semelhantes. Os teores dos álcalis totais bem como o teor de Fe₂O₃ são superiores a 1,0% e devem ser investigados quanto à solubilidade para melhor avaliar o emprego desse material como agregado (QUARCIONI *et al.*, 2003) porque existe risco de reatividade álcali-sílica. O comportamento desses teores na granulometria é semelhante, como apresentado na Figura 4.10, apesar dos teores de CaO nas frações

abaixo de 2,4 mm do tipo TQ serem inferiores aos das respectivas frações do tipo B, enquanto que os teores de Al_2O_3 são superiores. Existe uma redução significativa nos teores de SiO_2 e aumento significativo na perda ao fogo, em alguns casos, acompanhados pelos teores de Al_2O_3 e de CaO , nas frações abaixo de 0,15 mm.

Figura 4.10 Teores dos óxidos SiO_2 (a), Al_2O_3 (b), CaO (c) e perda ao fogo (d) na análise química das frações granulométricas TQ e B do agregado de RCD reciclado de IT V.

4.3.2 Itaquera cinza

A Tabela 4.4 e Tabela 4.5 apresentam os teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas TQ e B, respectivamente, do agregado de RCD reciclado de IT C.

Tabela 4.4 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas TQ do agregado de RCD reciclado de IT C.

Fração (mm)	Massa (%)	Teores dos óxidos (% em massa)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF	Total
-25,4+19,1	8,59	63,9	9,2	9,7	3,4	1,5	1,4	2,3	0,6	0,2	0,1	7,6	100,0
-19,1+12,7	12,99	64,8	9,1	9,6	3,4	1,5	1,5	2,3	0,6	0,2	0,3	6,5	99,7
-12,7+9,5	7,48	68,8	8,7	7,7	2,5	1,0	1,6	2,7	0,3	<0,1	0,2	7,8	101,3
-9,5+4,8	12,45	66,0	9,5	8,6	2,7	1,3	1,4	2,6	0,4	0,1	0,2	8,2	101,1
-4,8+2,4	8,41	66,4	8,8	8,6	2,6	1,1	1,2	2,6	0,4	0,1	0,2	9,0	101,1
-2,4+1,2	6,97	67,5	8,3	8,2	2,4	1,0	1,0	2,5	0,3	<0,1	0,2	8,4	99,8
-1,2+0,6	6,62	71,2	7,2	7,3	2,2	0,9	0,6	2,1	0,3	<0,1	0,3	6,9	99,0
-0,6+0,3	5,81	75,6	5,8	5,9	2,0	0,7	0,4	1,6	0,3	<0,1	0,1	7,9	100,4
-0,3+0,15	4,47	68,3	7,4	7,7	2,6	1,0	0,4	1,7	0,5	<0,1	<0,1	10,1	99,6
-0,15	3,77	47,8	11,1	13,5	3,6	1,8	0,5	1,8	0,7	0,2	0,3	20,0	101,1
MP		66,5	8,6	8,7	2,8	1,2	1,1	2,3	0,4	0,1	0,2	8,4	-
Max		75,6	11,1	13,5	3,6	1,8	1,6	2,7	0,7	0,2	0,3	20,0	-
Min		47,8	5,8	5,9	2,00	0,7	0,4	1,6	0,3	0,0	0,0	6,5	-

MP significa media ponderada pela massa.

Nos cálculos, os valores (< 0,10) foram considerados como zero.

Tabela 4.5 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo na análise química das frações granulométricas B do agregado de RCD reciclado de IT C.

Fração (mm)	Massa (%)	Teores dos óxidos (% em massa)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF	Total
-25,4+19,1	7,26	66,6	9,3	8,5	2,8	1,2	1,5	2,9	0,4	0,1	0,1	6,7	100,1
-19,1+12,7	8,80	66,7	8,6	8,6	2,9	1,3	1,3	2,4	0,5	0,1	0,2	8,1	100,8
-12,7+9,5	1,77	64,1	7,5	11,2	3,0	1,8	0,9	2,1	0,5	0,1	0,2	9,8	101,2
-9,5+4,8	1,52	66,6	7,6	9,5	2,7	1,3	0,9	2,4	0,4	0,1	0,3	8,4	100,2
-4,8+2,4	0,83	67,5	7,2	9,9	2,2	1,4	0,8	2,1	0,4	<0,1	0,6	9,2	101,3
-2,4+1,2	0,54	69,6	6,5	8,5	2,4	1,2	0,7	1,9	0,4	<0,1	0,2	8,5	99,9
-1,2+0,6	0,47	75,7	5,0	6,9	1,9	0,8	0,4	1,6	0,2	<0,1	<0,1	6,8	99,5
-0,6+0,3	0,43	76,6	4,5	6,8	2,0	0,7	0,3	1,5	0,2	<0,1	<0,1	6,7	99,4
-0,3+0,15	0,37	70,3	5,4	9,2	2,4	1,0	0,4	1,6	0,4	<0,1	0,1	9,1	100,0
-0,15	0,46	49,8	8,4	17,5	3,0	2,0	0,6	1,9	0,5	0,2	0,5	16,1	100,5
MP		66,6	8,4	9,0	2,8	1,3	1,2	2,4	0,4	0,1	0,2	8,0	
Max		76,6	9,3	17,5	3,0	2,0	1,5	2,9	0,5	0,2	0,6	16,1	
Min		49,8	4,5	6,8	1,9	0,7	0,3	1,5	0,2	0,0	0,0	6,7	

MP significa media ponderada pela massa.

Nos cálculos, os valores (< 0,10) foram considerados como zero.

Da mesma forma, os óxidos principais das frações granulométricas TQ e B do agregado de RCD reciclado de IT C são SiO₂, Al₂O₃ e CaO com valores significativos de perda ao fogo. A fração solúvel dos álcalis totais e do óxido Fe₂O₃ precisa ser analisada para se discutir o emprego como agregados. Os teores de SiO₂ das frações TQ e B do agregado reciclado de IT C são muito semelhantes, pois variaram de 47,8 a 75,6%, e de 49,8 a 76,6%, respectivamente. O mesmo ocorre para os teores de perda ao fogo das frações TQ e B que variaram de 6,5 a 20,0%, e 6,7 a

16,1%, respectivamente. O comportamento desses teores na granulometria é semelhante, como apresentado na Figura 4.11, apesar dos teores de Al_2O_3 nas frações do tipo TQ serem discretamente superiores aos das respectivas frações do tipo B, enquanto que os teores de CaO nas frações abaixo de 12,7 mm serem ligeiramente inferiores. Existe uma redução significativa nos teores de SiO_2 e aumento significativo na perda ao fogo acompanhado pelos teores de CaO nas frações abaixo de 0,15 mm.

Figura 4.11 Teores dos óxidos SiO_2 (a), Al_2O_3 (b), CaO (c) e perda ao fogo (d) na análise química das frações granulométricas TQ e B do agregado de RCD reciclado de IT C.

4.3.3 Vinhedo vermelho

A Tabela 4.6 e Tabela 4.7 apresentam os teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo obtidos na análise química das frações granulométricas TQ e B, respectivamente, do agregado de RCD reciclado de VI V.

Tabela 4.6 Teores (% em massa) dos óxidos e perda ao fogo na análise química das frações granulométricas TQ do agregado de RCD reciclado de VI V.

Fração (mm)	Massa (%)	Teores dos óxidos (% em massa)											Total
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF	
-25,4+19,1	7,02	71,8	9,7	6,8	1,9	0,8	0,4	1,5	0,5	<0,1	0,3	6,7	100,5
-19,1+12,7	8,15	71,1	10,2	5,1	3,1	0,9	0,7	1,9	0,5	<0,1	0,2	6,9	100,6
-12,7+9,5	3,29	69,5	10,2	6,1	3,0	1,0	0,8	2,0	0,6	<0,1	1,1	7,5	101,7
-9,5+4,8	4,96	69,4	11,2	5,5	3,0	1,1	1,4	2,2	0,5	<0,1	0,3	6,1	100,8
-4,8+2,4	3,46	69,0	10,4	5,9	3,4	1,1	0,8	1,9	0,5	<0,1	0,3	6,3	99,8
-2,4+1,2	3,56	78,4	7,2	3,4	2,5	0,6	0,5	1,5	0,4	<0,1	0,1	4,7	99,4
-1,2+0,6	4,45	85,1	4,7	2,1	2,1	0,4	0,2	1,1	0,2	<0,1	<0,1	3,1	98,9
-0,6+0,3	4,34	85,1	4,3	1,9	2,1	0,3	0,1	1,0	0,2	<0,1	<0,1	3,7	98,9
-0,3+0,15	5,65	82,1	5,5	2,6	2,3	0,5	0,2	1,2	0,4	<0,1	0,1	4,1	99,0
-0,15	9,36	51,8	18,0	6,9	5,2	1,3	0,3	2,0	0,9	0,2	0,4	14,0	100,9
MP		69,5	10,1	6,0	3,2	1,1	0,7	2,0	0,5	<0,1	0,3	6,8	
Max		85,1	18,0	6,9	5,2	1,3	1,4	2,2	0,9	0,2	1,1	14,0	
Min		51,8	4,3	1,9	1,9	0,3	0,1	1,0	0,2	0,0	0,0	3,1	

MP significa media ponderada pela massa.

Nos cálculos, os valores (< 0,10) foram considerados como zero.

Tabela 4.7 Teores (% em massa) dos óxidos das análises químicas das frações granulométricas B do agregado de RCD reciclado de VI V.

Fração (mm)	Massa (%)	Teores dos óxidos (% em massa)											Total
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF	
-25,4+19,1	8,97	61,7	10,1	10,9	3,5	1,9	1,4	2,6	0,4	0,1	0,4	7,4	100,5
-19,1+12,7	19,12	68,7	11,7	5,3	3,6	1,2	0,8	2,5	0,6	<0,1	0,2	5,2	99,8
-12,7+9,5	4,44	69,4	7,7	7,9	2,5	1,2	1,0	2,6	0,3	<0,1	0,3	7,4	100,4
-9,5+4,8	4,41	65,5	10,4	8,3	3,3	1,5	0,9	2,3	0,5	0,1	0,3	7,5	100,7
-4,8+2,4	2,24	67,5	9,9	6,6	3,3	1,3	0,7	2,1	0,5	<0,1	0,3	6,3	98,5
-2,4+1,2	1,34	72,7	8,2	5,9	2,8	0,9	0,5	1,9	0,4	<0,1	0,2	6,0	99,6
-1,2+0,6	1,13	78,2	6,0	4,3	2,2	0,6	0,4	1,5	0,3	<0,1	0,2	4,5	98,2
-0,6+0,3	1,11	80,9	5,8	4,3	2,1	0,6	0,3	1,5	0,3	<0,1	0,1	4,3	100,3
-0,3+0,15	1,07	77,4	5,9	5,0	2,3	0,7	0,3	1,4	0,5	<0,1	0,1	5,2	98,8
-0,15	1,93	53,9	13,1	12,2	3,7	1,7	0,5	2,1	0,7	0,1	0,4	13,2	101,6
MP		67,2	10,3	7,2	3,3	1,3	0,9	2,4	0,5	<0,1	0,3	6,4	
Max		80,9	13,1	12,2	3,7	1,9	1,4	2,6	0,7	0,1	0,4	13,2	
Min		53,9	5,8	4,3	2,1	0,6	0,3	1,4	0,3	0,0	0,1	4,3	

MP significa media ponderada pela massa.

Nos cálculos, os valores (< 0,10) foram considerados como zero.

Como para os outros tipos de agregados (IT C e IT V), os óxidos principais das frações granulométricas TQ e B do agregado de RCD reciclado de VI V são SiO₂, Al₂O₃ e CaO com valores significativos de perda ao fogo, sendo necessária a investigação da fração solúvel dos álcalis totais e do óxido Fe₂O₃ para se discutir o emprego como agregados. São semelhantes os teores médios ponderados de SiO₂, CaO e de Al₂O₃ das frações TQ e B, inclusive a perda ao fogo. O comportamento

desses teores na granulometria é semelhante, como apresentado na Figura 4.12. Existe uma redução significativa nos teores de SiO_2 e aumento significativo na perda ao fogo acompanhado pelos teores de Al_2O_3 nas frações abaixo de 0,15 mm. Além disso, os teores de SiO_2 nas frações abaixo de 12,7 mm do tipo TQ são ligeiramente superiores aos das respectivas frações do tipo B, assim como os teores de CaO são inferiores.

Figura 4.12 Teores dos óxidos SiO_2 (a), Al_2O_3 (b), CaO (c) e perda ao fogo (d) na análise química das frações granulométricas TQ e B do agregado de RCD reciclado de VI V.

4.3.4 Influência da origem, classificação e granulometria dos agregados de RCD reciclados

Como não existe diferença expressiva nos resultados da análise química entre as frações granulométricas TQ e B, eles foram ponderados pela massa, por fração granulométrica, como um único resultado.

Para os três tipos agregados de RCD reciclados, os teores de sulfato total nos agregados de RCD reciclados foram baixos (inferiores a 1% em massa), assim como a presença do gesso, não sendo possível analisar esse tipo de influência. Já os teores de álcalis totais (Na_2O e K_2O) e Fe_2O_3 foram considerados elevados. No entanto os resultados do Apêndice C dos íons solúveis (Na , K , Ca , Mg , Cl e SO_4^{2-}), em mg/g de amostra, nas frações selecionadas, foram baixos e não apresentam qualquer risco no uso como agregados, não sendo relevante analisar essa influência.

A Figura 4.13 mostra os teores ponderados de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e perda ao fogo das frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.

Para os três tipos de agregados de RCD reciclados, os teores de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e perda ao fogo variaram de 45 a 85%, de 4 a 16%, de 2 a 14%, e de 4 a 20%, respectivamente. O comportamento das curvas é semelhante para os três tipos de agregados de RCD reciclados, especialmente para os agregados de IT C e IT V, sendo pouco influenciados pela classificação cinza e vermelho. Os teores de SiO_2 nas frações abaixo de 2,4 mm do agregado de VI V são superiores aos das frações respectivas dos agregados de IT C e IT V, assim como os teores de CaO e da perda ao fogo nas frações abaixo de 12,7 mm são inferiores, sendo o comportamento da curva mais influenciado pela origem.

Isso pode ser comprovado por uma análise estatística. Os teores ponderados de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e da perda ao fogo das frações granulométricas, quando agrupados em função dos tipos de agregados de RCD reciclados (IT C, IT V e VI V), seguem uma distribuição normal, conforme os resultados apresentados no Apêndice D. O teste de análise de variância e comparação múltipla de médias permite concluir que houve diferença estatística significativa na média dos teores dos óxidos de SiO_2 e CaO e da perda ao fogo do agregado de VI V em relação aos demais tipos de agregados.

Apesar disso, a maior diferença ainda foi atribuída à composição química da fração fina (passante em 0,15 mm).

Figura 4.13 Teores ponderados de SiO_2 (a), Al_2O_3 (b), CaO (c) e perda ao fogo nas frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.

4.3.5 Interpretação dos resultados

A origem das espécies químicas SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 dos agregados de RCD reciclados está associada aos diversos tipos de silicatos, provenientes das partículas mistas de pasta de cimento endurecida e de agregados naturais, de rochas naturais, de cerâmica vermelha ou de cerâmica branca.

Embora existam algumas fábricas de argamassa industrializada atuantes nas regiões da cidade de São Paulo e de Vinhedo que utilizam agregados de rocha

calcária, os agregados de rochas ígneas, tais como basalto, granito, ou metamórficas, como gnaisses, são utilizados, quase na totalidade do mercado. Neste caso, a origem do óxido de cálcio está associada ao aglomerante (pasta endurecida de cimento e cal) presente em componentes construtivos. Tal situação não será válida para regiões que utilizam agregados de rocha calcária, pois as composições químicas serão significativamente diferentes.

Para interpretação da perda ao fogo, podem-se assumir as seguintes hipóteses:

a) não existe água de constituição na cerâmica vermelha ou branca queimada acima de 500°C, b) o teor de CO₂ proveniente de rochas carbonáticas é desprezível, c) a água de constituição em rochas naturais é desprezível.

Conseqüentemente, os teores de perda ao fogo estarão associados a: a) liberação da água de constituição e gás carbônico dos silicatos de cálcio hidratado, cal hidratada ou carbonatos, e b) liberação de água dos argilominerais provenientes dos solos, cerâmicas queimadas abaixo de 500° C, e rochas naturais como granitos e feldspatos (KLEIN; HURBURT, 1937).

Como os teores de Al₂O₃ são tão elevados quanto os teores de CaO, pode-se concluir que, de fato, nem toda a alumina presente é proveniente da pasta de cimento endurecida que é, na ordem, de até 10% do teor de CaO¹⁴, contendo desde um cimento *Portland* sem adição até um composto com 30% de escória. Desta forma, eles são originários da cerâmica e das rochas naturais.

A Figura 4.14 mostra a correlação entre os teores de perda ao fogo e os teores de CaO. O valor do coeficiente de correlação é baixo porque a perda ao fogo não depende somente da perda de água e do CO₂ do aglomerante (pasta de cimento ou cal endurecida, gesso ou outros), mas também da argila. O coeficiente de correlação aumenta quando os teores de perda ao fogo estão correlacionados com a soma dos teores de CaO e Al₂O₃. Pode-se concluir que as fases minerais hidratadas da Al₂O₃ que contribuem na perda ao fogo estão associadas à presença de argilominerais

¹⁴ Calculado a partir de análise química de um cimento *portland* comum e composto com 30% de escória (dados extraídos de JOHN, 1995).

provenientes de cerâmica vermelha queimada abaixo de 500°C ou de solo misturado, em menores quantidades, nesses agregados.

Figura 4.14 Correlação entre os teores de perda ao fogo e os teores de CaO (a), e entre os teores de perda ao fogo e a soma dos teores de CaO e Al₂O₃ (b) para as frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.

Como os teores de CaO não ultrapassam 20% em massa e a relação CaO/SiO₂ varia entre 2,5 e 3,0 para os cimentos *Portland* com adição de até 30% de escória (JOHN, 1995), admite-se um teor de SiO₂ máximo de 8% que é originado do aglomerante, e, assim, pode-se concluir que a maior parte dos silicatos presentes é proveniente de rochas naturais, da cerâmica vermelha ou cerâmica branca. Para efeito de simplificação, nessa análise, foi desprezado o teor de SiO₂ proveniente da cal.

A Figura 4.15 mostra que é possível estabelecer uma correlação linear inversa entre a soma dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, que representa principalmente os silicatos das rochas naturais e das cerâmicas, e a soma dos teores de CaO e de perda ao fogo, que representa indiretamente os aglomerantes e argilominerais.

Figura 4.15 Correlação entre a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e a soma dos teores de CaO e de perda ao fogo (a) e entre a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e os teores de CaO (b) para as frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.

É também possível estabelecer uma correlação linear inversa entre a soma dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que representa principalmente os silicatos das rochas naturais e das cerâmicas, e os teores de CaO , que representam indiretamente os aglomerantes hidratados ou carbonatados.

A Figura 4.16 mostra a relação entre os teores de CaO e SiO_2 para as frações granulométricas de IT C, IT V e VI V. Essa relação pode variar em função da classificação dos agregados de RCD reciclados. O agregado IT C é mais rico em CaO que os agregados IT V e VI V. Os teores de CaO que representam indiretamente os aglomerantes variam nos agregados de RCD reciclados.

Figura 4.16 Correlação entre os teores de SiO_2 e CaO para as frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados de ITC, IT V e VI V.

4.4 Análise mineralógica por DRX

A Figura 4.17 mostra os difratogramas das frações granulométricas selecionadas dos agregados de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V com a identificação das fases minerais ou cristalinas nos três picos 2 θ de maior intensidade.

A técnica de difração de raios X somente identifica, de forma efetiva, fases cristalinas com concentração, em geral, acima de 5%. Embora não detectadas na maior parte dos difratogramas, as fases cristalinas do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e CH (hidróxido de cálcio) estão presentes. Elas podem ser detectadas pela termogravimetria uma vez que a perda de água destas fases cristalinas com a temperatura é um evento térmico endotérmico com pico de temperatura característico (RAMACHANDRAN; PHIL, 1969).

As fases cristalinas pertencem aos três grupos de materiais: a) tectosilicatos provenientes de rochas naturais, b) carbonatos e fases de aglomerantes hidratados, e c) filossilicatos (ilita, flogopita, muscovita, merlionita e caulinita) provenientes de argilominerais. A presença de cerâmica branca ou de adições do cimento, tais como cinza volante, é baixa, visto que não foi identificada mulita nas difrações.

Figura 4.17 Difractogramas das frações granulométricas selecionadas dos agregados de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V com identificação das fases minerais ou cristalinas. **Legenda:** Mu- muscovita; Fl- flogopita; Il – ilita; E – etringita; Me – merlionita; Ca- caulinita; Si – sílica; Mi – microclínio; Al –albita; C – calcita; Gi - gismondina.

A presença de argilominerais foi confirmada pelos picos principais situados entre 5 e 15° 2 θ (SANTOS, 1975) nas frações granulométricas graúdas (até 4,8 mm), miúdas (entre 4,8 e 0,15 mm) e finas (passante em 0,15 mm) dos diferentes tipos de agregados de RCD reciclados: IT C, IT V e VI V. Pela análise dos difratogramas, pode-se concluir que: a) existem distintas variedades de argilominerais na fração fina, “- 0,15 mm”, tais como muscovita, flogopita, caulinita, merlionita, b) essas variedades mudam em função da origem e da classificação mineral dos agregados de RCD reciclados, uma vez que a merlionita e flogopita só foram encontradas nos agregados de Itaquera, e a muscovita e caulinita não foram encontradas nos agregados do tipo cinza.

A intensidade nos picos dos tectosilicatos (quartzo e feldspatos) é mais expressiva na fração miúda, “4,8+0,15 mm”, seguida da fração graúda, “25,4+4,8 mm” e da fração fina, “-0,15 mm”, respectivamente.

4.5 Termogravimetria – antes e após o ataque com HCl 33%

A Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20 mostram as derivadas de perda de massa das frações granulométricas selecionadas.

Os picos de pequena intensidade (em torno de 0,01%/min) identificados pelas derivadas das curvas de perda de massa foram atribuídos a um erro na termobalança, não sendo, portanto, considerados na análise.

A Tabela 4.8 resume os eventos térmicos esperados nos materiais de construção civil, seus picos característicos de temperaturas e as suas relações com os aglomerantes e os argilominerais a partir de análise dos dados disponíveis na bibliografia.

Após o ataque com HCl, o aglomerante foi, em parte, removido, restando rochas e argilominerais, pois a contribuição relativa à perda de água combinada do C-S-H e da etringita, que desloca a temperatura de pico e perfil da derivada da curva de perda de massa, não está mais presente. A amplitude do primeiro evento térmico reduziu tipicamente para um evento associado à perda de água adsorvida. Esse tipo de evento é característico na ilita, sendo dependente da área específica e

cristalinidade dos argilominerais (RAMACHANDRAN *et al.*; 2003). O mesmo ocorreu para a muscovita. Não se pode afirmar, no entanto, que este evento é exclusivamente relacionado à perda de água adsorvida dos argilominerais.

Após o primeiro evento térmico até 300°C, existe uma sobreposição de eventos associados à perda de água das fases hexagonais hidratadas do C₃A do aglomerante e à perda de água da gibsita que desloca os picos de temperatura. Após o ataque ácido, o evento associado às fases hexagonais hidratadas do C₃A do aglomerante desaparece, mantendo-se apenas os eventos relativos à presença da gibsita de argilominerais nas frações finas com pico de temperatura próximo a 270 °C.

Entre 300 e 550°C, três eventos térmicos são observados, de forma sobreposta, antes do ataque ácido. O primeiro é relativo à presença de brucita e perda de água das hidroxilas das espécies químicas Fe₂O₃ e Al₂O₃ da constituição dos argilominerais. O segundo é relativo à perda de água da portlandita dos aglomerantes e à perda de água das hidroxilas das espécies químicas Fe₂O₃ e Al₂O₃ da constituição dos argilominerais, sendo a temperatura de pico influenciada pela cristalinidade e tipo de argilomineral. Após o ataque com HCl, o primeiro evento que está relacionado à presença do aglomerante desaparece, restando apenas o evento de perda das hidroxilas da ilita próximo a 360°C. A amplitude do segundo evento diminui, uma vez que a portlandita do aglomerante, que apresenta evento térmico até 550°C, em parte, é eliminada. Os eventos remanescentes estão tipicamente associados à presença dos argilominerais (caulinita, ilita, flogopita e merlionita) com pico próximo a 500 °C.

A partir de 550°C, após o ataque, todos os eventos associados à presença de carboaluminatos e da calcita desaparecem, especialmente até 900 °C. Os eventos de 500 a 700 °C e de 850 a 1.000°C se referem à presença de tipos específicos de argilominerais como a muscovita e a flogopita. Eles influenciaram os eventos térmicos e picos de temperatura encontrados após 900°C antes do ataque.

Figura 4.18 Derivadas da curvas de perda de massa das frações granulométricas graúdas selecionadas, antes e após o ataque com HCl.

Figura 4.19 Derivadas da curvas de perda de massa das frações granulométricas miúdas selecionadas, antes e após o ataque com HCl.

DTG /(%/min)

Figura 4.20 Derivadas das curvas de perda de massa das frações granulométricas finas, antes e após o ataque com HCl.

Tabela 4.8 Eventos térmicos, picos característicos de temperaturas e suas relações com os aglomerantes e os argilominerais.

	Evento térmico (°C)	Pico caract. (°C)	Análise dos materiais isolados disponível na bibliografia
Antes do ataque com HCl	40-220	103-113	- Perda de água adsorvida, e combinada do C-S-H e da etringita (TAYLOR, 1990; RAMANCHANDRAN <i>et al.</i> , 2003). - Perda de água adsorvida dos argilominerais (SANTOS, 1975; GRIM, 1953).
	220-300	258 275-285	- Perda de água das fases hexagonais hidratadas do C ₃ A do aglomerante (RAMANCHANDRAN <i>et al.</i> , 2003), associada à primeira temperatura de pico. - Na presença de merlionita e flogopita, surge um evento térmico com pico de temperatura em 270°C relativo à presença de gibsita (SANTOS, 1975; GRIM, 1953) associada à segunda temperatura de pico.
	340-400	381-409	- Perda das hidroxilas das espécies químicas Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃ (RAMACHANDRAN <i>et al.</i> , 2003) proveniente de argilominerais sem definição de pico característico de temperatura. - Perda de água da brucita (RAMACHANDRAN; PHIL, 1969) dos aglomerantes ou dos argilominerais que contêm Mg na sua composição com pico de temperatura entre 340 e 390°C..
	400-550	478-512	- Perda de água da portlandita dos aglomerantes (RAMANCHANDRAN <i>et al.</i> , 2003) encoberta na presença de argilominerais (KOLIAS <i>et al.</i> , 2005). - Perda das hidroxilas das espécies químicas Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃ (RAMACHANDRAN <i>et al.</i> , 2003) proveniente de argilominerais em temperaturas próximas a 500°C dependendo da cristalinidade
	550-1000	672-694 753-772 831-858 909 965	- Perda do anidrido carbônico dos carboaluminatos e da calcita mal e bem cristalizada até 900 °C (DWECK <i>et al.</i> , 2000; STEPKOWSKA <i>et al.</i> , 2004; RAMACHANDRAN; PHIL, 1969). - Perda das hidroxilas da flogopita (RAMACHANDRAN <i>et al.</i> , 2003).
Depois do ataque com HCl	40-150	80-98	- Perda de água adsorvida dos argilominerais (SANTOS, 1975; GRIM, 1953).
	150-300	267-278	- Na presença de merlionita e flogopita, surge um evento térmico com pico de temperatura em 270°C relativo à presença de gibsita (SANTOS, 1975; GRIM, 1953).
	300-500	361 470-518	- Perda das hidroxilas das espécies químicas Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃ (RAMACHANDRAN <i>et al.</i> , 2003) proveniente de argilominerais. - O primeiro pico se refere à perda de hidroxilas menos abrupta da ilita (GRIM, 1953). - O segundo pico se refere à perda de hidroxilas de constituição da caulinita, ilita, flogopita e merlionita podendo atingir temperaturas superiores a 500°C dependendo da cristalinidade (SANTOS, 1975; GRIM, 1953; HORVÁTH <i>et al.</i> , 2003; COSTA <i>et al.</i> , 2004)
	500-700	-	- Perda de hidroxilas da muscovita (RAMACHANDRAN <i>et al.</i> , 2003).
	850-1000	951-974	- Perda de hidroxilas da flogopita (RAMACHANDRAN <i>et al.</i> , 2003).

O apêndice C apresenta as curvas de perdas de massa quantificadas em diversas faixas de temperatura, antes e após o ataque com HCl, das frações granulométricas selecionadas. A Tabela 4.9 resume esses resultados em algumas faixas de temperaturas pré-definidas, para a quantificação da parcela hidratada e carbonatada, em porcentagem, do aglomerante que foi perdida na solubilização pelo ataque, bem como o teor de calcita proveniente de rochas calcárias.

Tabela 4.9 Perda de massa da análise termogravimétrica, em algumas faixas de temperaturas pré-definidas, para quantificação da parcela percentual hidratada e carbonatada do aglomerante, e o teor de calcita.

Frações granulométricas (mm)	0-550 °C (%)			550-750 °C (%)			> 750 °C (%)			Resultados (%)		
	A	D	Δ1	A	D	Δ2	A	D	Δ3	H ₂ O agl.	CO ₂ agl.	C
-25,4+19,1 (IT V)	2,97	0,71	2,26	2,20	0,11	2,09	0,76	0,06	0,70	52,0	48,0	1,6
-9,5+4,8 (IT C)	4,05	0,59	3,46	3,41	0,10	3,31	0,37	0,18	0,19	51,1	48,9	0,4
-19,1+12,7 (VI V)	3,61	1,47	2,14	2,61	0,23	2,38	0,35	0,05	0,30	47,3	52,7	0,7
Média										50,1	49,9	0,9
-1,2+0,6 (IT V)	4,12	1,64	2,48	2,26	0,17	2,09	1,56	0,28	1,28	54,3	45,7	2,9
-0,6+0,3 (IT C)	4,24	0,83	3,41	2,74	0,07	2,67	0,56	0,16	0,40	56,1	43,9	0,9
-2,4+1,2 (VI V)	3,25	1,25	2,00	2,12	0,15	1,97	0,25	0,14	0,11	50,4	49,6	0,2
Média										53,6	46,4	1,4
-0,15 (IT V)	10,05	4,03	6,02	5,04	0,50	4,54	2,22	0,67	1,55	57,0	43,0	3,5
-0,15 (IT C)	9,73	3,19	6,54	6,39	0,35	6,04	1,90	0,49	1,41	52,0	48,0	3,2
-0,15 (VI V)	9,09	6,31	2,78	4,45	0,81	3,64	1,10	0,48	0,62	43,3	56,7	1,4
Média										50,8	49,2	2,7

A – antes do ataque com HCl; D – depois do ataque com HCl

Δ – diferença na perda de massa, antes e depois do ataque com HCl; C- teor de calcita

$$H_2O_{agl.(\%)} = \frac{\Delta 1}{\Delta 1 + \Delta 2}$$

$$CO_{2.(\%)} = \frac{\Delta 2}{\Delta 1 + \Delta 2}$$

$$C.(\%) = \frac{\Delta 3}{0,44}$$

A parcela hidratada ou carbonatada não variou significativamente entre as frações granulométricas selecionadas, sendo aproximadamente 50% de cada parcela, apesar do aumento de área de pasta de cimento ou de cal endurecida exposta nas frações granulométricas miúdas e finas. A diferença da perda de massa acima de 750 °C representa a fração de CO₂ da calcita bem cristalizada proveniente de rochas calcárias. Ela variou de 0,11% a 1,55%, permitindo estimar uma variação no teor de calcita entre 0,25 e 3,52%.

A partir das análises termogravimétricas, pode-se concluir que, após o ataque com HCl, todos os eventos térmicos e picos característicos referentes à presença dos aglomerantes carbonatados, a partir de 550 °C, desapareceram comprovando que a solubilização foi eficiente. Assim, como a fração carbonatada dos aglomerantes foi solubilizada, pode-se inferir, com segurança, que a fração hidratada dos aglomerantes também foi solubilizada por se tratar de fase cristalina menos estável.

4.6 Estimativa dos teores de aglomerantes e de argilominerais

A Tabela 4.10 mostra a estimativa dos teores de aglomerantes e de argilominerais presentes nas frações granulométricas selecionadas nos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.

Tabela 4.10 Estimativa dos grupos de materiais presentes nas frações granulométricas selecionadas dos agregados de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V.

Frações selecionadas		RI _{100°C} (%)	H ₂ O ₍₂₎ (%)	A (%)	AR (%)	RO+CE (%)
Graúdas	-25,4+19,1 (IT V)	81,3	0,5	18,7	5,6	75,7
	-9,5+4,8 (IT C)	75,4	0,7	24,6	7,8	67,6
	-19,1+12,7 (VI V)	80,8	0,9	19,2	10,0	70,8
Média				20,8	7,8	71,4
Miúdas	-1,2+0,6 (IT V)	82,0	1,7	18,0	18,9	63,1
	-0,6+0,3 (IT C)	81,0	0,9	19,0	10,0	71,0
	-2,4+1,2 (VI V)	83,9	0,8	16,1	8,9	75,0
Média				17,7	12,6	69,7
Finas	-0,15 (IT V)	61,0	4,2	39,0	46,7	14,3
	-0,15 (IT C)	56,8	3,1	43,0	34,4	22,6
	-0,15 (VI V)	68,1	5,2	31,9	57,8	10,3
Média				38,0	46,3	15,7

RI_{100°C} – resíduo insolúvel do ataque por solução de HCl, seco a 100°C.

A – teor de aglomerantes.

H₂O₍₂₎ – teor de água de constituição dos argilominerais determinada pela perda de massa da termogravimetria entre 150 a 1.000°C no resíduo insolúvel após ataque com HCl.

AR=H₂O₍₂₎/0,09

RO+CE – rochas e cerâmica.

Os teores de aglomerantes e de argilominerais variaram de 16,1 a 24,6%, e de 5,6 a 18,9%, respectivamente, nas frações granulométricas graúdas e miúdas. Já nas frações granulométricas finas, os teores de aglomerantes e de argilominerais variaram de 31,9 a 43,0%, e de 34,4 a 57,8%, respectivamente, sendo a média desses teores superior à das frações graúdas e miúdas.

A determinação dos teores de argilominerais apresenta erros relativos estimados na ordem de 40%, porque são adotados valores médios para as misturas de caulinita com os demais tipos de argilominerais na análise estequiométrica. Apesar disso, os teores de argilominerais das frações finas superam significativamente os valores especificados para as recomendações de uso de agregados em concretos (SMITH; COLLIS, 1993). Os teores de rochas e de cerâmica são inferiores a 25%.

As médias dos teores dos aglomerantes, dos argilominerais e da soma de rochas e de cerâmica, nas frações finas, foram estatisticamente diferentes das médias dos teores nas frações miúdas e graúdas, segundo o teste de análise de variância e de comparação múltipla entre médias do Apêndice D.

4.7 Conclusões do capítulo

As frações granulométricas acima de 25,4 mm representam mais de 20% da massa dos agregados de RCD reciclados caracterizados. Neste caso, como a composição química e mineralógica desta fração é muito semelhante à das frações granulométricas menores que 25,4 mm, ela deve ser reprocessada e composta para uso dos agregados de RCD reciclados em concretos, requerendo, portanto, mais de um estágio de cominuição.

Embora a fração miúda dos agregados de RCD reciclados não seja comumente utilizada em concretos, o seu emprego é fundamental para a viabilidade técnica das usinas de reciclagem da fração mineral do RCD em função da sua representatividade de massa (média aproximada de 50 %).

Os principais óxidos que compõem a fração mineral do RCD são SiO_2 , Al_2O_3 , e CaO acompanhados de elevados teores de perda ao fogo. As fases minerais identificadas pela DRX correspondem a distintas variedades de silicatos e carbonatos (ULSEN *et al.*, 2004).

É possível estabelecer uma correlação linear inversa entre a soma dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 que, essencialmente, representa os silicatos de rochas naturais e cerâmicas presentes, e a soma dos teores de CaO e de perda ao fogo, que representa indiretamente os aglomerantes e argilominerais.

A perda ao fogo não pode ser associada diretamente à perda de água combinada e de CO_2 dos aglomerantes (pasta de cimento ou cal endurecida, principalmente). A parcela hidratada do aglomerante corresponde a 50%, sendo o restante da parcela carbonatada. Fases hidratadas dos argilominerais provenientes de cerâmica vermelha queimada abaixo de 500°C, de solo misturado ou de rochas naturais contribuem para a perda ao fogo. Estes argilominerais, tais como ilita,

muscovita, flogopita, merlionita e caulinita foram identificados por difração de raios-X.

A composição química dos agregados de RCD reciclados varia em função da origem da fração mineral do RCD (Itaquera ou Vinhedo) e nas frações finas, “<0,15 mm”, se comparada às demais frações granulométricas.

Os teores de sulfato total e solúvel bem como os teores de álcalis totais (Na_2O e K_2O) e solúveis foram baixos nas amostras estudadas e não são críticos para o uso como agregados.

Os agregados de RCD reciclados podem ser classificados nos seguintes grupos de materiais a partir da caracterização química e mineralógica:

- a) RO+CE: silicatos provenientes de rochas naturais e da cerâmica.
- b) A: aglomerantes provenientes de pasta endurecida de cimento ou cal.
- c) AR: argilominerais provenientes de solos, cerâmicas vermelhas mal queimadas, abaixo de 500 °C, ou rochas naturais.

As análises das derivadas das curvas de perda de massa da termogravimetria permitiram concluir que os aglomerantes foram solubilizados de maneira satisfatória no ataque com HCl 33%. O método proposto por QUARCIONI (1998) pode ser utilizado para quantificar o teor de aglomerantes presentes nos agregados de RCD reciclados, desde que o resíduo insolúvel seja seco a 100°C, quando não existem agregados e rochas calcárias no resíduo. Nesse estudo, o erro relativo associado à presença de calcita foi na ordem de 10%.

A água de constituição dos argilominerais pode ser estimada a partir da perda de massa do resíduo insolúvel deste ataque de 150 a 1.000°C, inclusive o teor de argilominerais, com erros relativos na ordem de 40%, caso uma constante estequiométrica seja empregada.

Os teores de aglomerantes e argilominerais reduzem a qualidade dos agregados de RCD reciclados no concreto (SANCHÉZ; ALAEJOS, 2004; SMITH; COLLIS, 1993). Na fração graúda e miúda, os aglomerantes e argilominerais podem representar até 36,9% da massa. As rochas e cerâmicas representam mais de 50% da massa. Na fração fina, os aglomerantes e argilominerais são predominantes, resultando um teor de rochas e de cerâmicas inferior a 22,6%.

O método proposto permite classificar os grupos de materiais presentes nos agregados de RCD reciclados com base na natureza e interação físico-química com o concreto, abandonando critérios subjetivos, como o de não considerar a existência de argilominerais em uma partícula de cerâmica vermelha ou não considerar a existência de rochas naturais em uma partícula cimentícia. Além disso, ele pode ser empregado para caracterizar as frações miúdas e finas, inviável pelo método da catação, baseado na análise visual das partículas.

5 SEPARAÇÃO DENSITÁRIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS

Os agregados graúdos de RCD reciclados são mais porosos que os agregados naturais de rochas calcárias e ígneas (LIMBACHIYA *et al.*, 2000) e esta porosidade está associada à presença da pasta de cimento endurecida (BARRA, 1996; BUYLE-BODIN; HADJIEVA-ZAHARIEVA, 2002; SÁNCHEZ; ALAEJOS, 2004), cerâmica vermelha e branca (ANGULO, 2000). Ela influencia a resistência mecânica de qualquer sólido (CALLISTER, 2000), inclusive de concretos (MEHTA; MONTEIRO, 1994; KUMAR; BHATTACHARJEE, 2003). Por outro lado, as propriedades físicas, absorção de água e massa específica aparente, das fases (concreto, argamassa, cerâmica e rocha) dos agregados graúdos de RCD reciclados que estão relacionadas com a porosidade (LARRAD, 1999; ASTM, 1993) são muito variáveis. A separação por fases por meio da catação não é eficiente para controlar o comportamento dos concretos produzidos.

Assim, a separação por líquidos densos pode ser interessante por separar os agregados de RCD reciclados em função da massa específica aparente das partículas que os constituem. Através da imersão em líquido de densidade intermediária é possível separar as partículas mais leves das mais pesadas (JONES, 1987; BURT, 1984; SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997; CAMPOS; LUZ, 1998).

Nessa operação de laboratório normalmente se utilizam soluções orgânicas tais como tetracloreto de carbono-benzeno, bromofórmio-álcool etílico, tetrabrometano-benzeno, e soluções inorgânicas tais como cloreto de zinco-água e sais de tungstênio-água (LST). As densidades, a depender do líquido empregado, podem atingir até 4,3 g/cm³ (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997; CAMPOS; LUZ, 1998). Esta separação, quando realizada sequencialmente, em densidades crescentes,

por fração granulométrica, e acompanhada do balanço de massa acumulado dos produtos separados, permite avaliar a curva de separabilidade do material (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982; SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997), bem como a liberação entre os grupos de materiais presentes nos agregados graúdos de RCD reciclados visto que podem estar associados em uma mesma partícula.

Neste capítulo, a separação densitária será restrita à fração graúda dos agregados de RCD reciclados pela: a) dificuldade de caracterização das propriedades físicas como massa específica aparente e absorção de água na fração miúda que exige uma diferenciação precisa entre porosidade e área superficial, b) dificuldade de quantificação das fases na fração miúda uma vez que o método da catação se torna inviável, c) grande disponibilidade de dados experimentais de caracterização da fração graúda na bibliografia.

Paralelamente, a metodologia de caracterização do capítulo 4, que considera análises químicas, mineralógicas e termogravimétricas e quantifica o teor de aglomerantes e de argilominerais presentes nos agregados de RCD reciclados, será utilizada para caracterizar esses produtos das separações densitárias.

Os objetivos deste capítulo são:

- a) avaliar a distribuição de massa de frações granulométricas dos agregados graúdos de RCD reciclados em diferentes intervalos de densidade;
- b) investigar a influência da densidade na composição de fases e de contaminantes dessas frações, e suas propriedades físicas; e
- c) investigar a influência da densidade na composição química e mineralógica dessas frações bem como nos teores de aglomerantes e de argilominerais.

5.1 Programa experimental, materiais e métodos

As frações granulométricas graúdas TQ e B dos diferentes tipos de agregados de RCD reciclados do capítulo 4 foram reduzidas e compostas e submetidas à separação por líquidos densos, gerando produtos com diferentes intervalos de

densidade. A seguir, alíquotas desses produtos foram separadas em fases por catação. As propriedades físicas dessas fases e dos produtos, através das alíquotas remanescentes, foram determinadas. Em seguida, a composição química dos produtos foi determinada por FRX. Com base nesses resultados, foram selecionados alguns produtos e submetidos à análise mineralógica, análise termogravimétrica antes do ataque com HCl e após, no resíduo insolúvel, e determinação dos teores de aglomerantes e argilominerais.

5.1.1 Preparação das frações granulométricas

A partir da separação granulométrica dos agregados e britagem apresentadas no item 4.1.2 do capítulo 4, as frações granulométricas TQ e B graúdas foram amostradas por amostrador Jones em alíquotas com massa variando de 1 a 3 kg, em função do tamanho médio das partículas. Em seguida, cada fração granulométrica foi composta resultando num total de 4 frações (em mm) para cada tipo de agregado (IT C, IT V ou VI V): -25,4+19,1; -19,1+12,7; -12,7+9,5; e -9,5+4,8.

A Tabela 5.1 mostra a massa das 12 frações granulométricas compostas dos agregados graúdos de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V encaminhadas para as separações minerais.

Tabela 5.1 Massas das frações granulométricas compostas dos agregados graúdos de RCD reciclados de IT C, IT V e VI V encaminhadas para as separações minerais.

Frações granulométricas (em mm)	Massa (g)		
	IT C	IT V	VI V
-25,4+19,1	3.293	3.262	4.642
-19,1+12,7	2.243	3.200	3.818
-12,7+9,5	1.881	1.508	3.276
-9,5+4,8	1.375	2.001	2.636

5.1.2 Separação por líquidos densos

A distribuição em massa das frações granulométricas de cada tipo de agregado nos intervalos de densidade foi avaliada. O procedimento adotado para a separação por líquidos densos foi sequencial conforme ilustrado na Figura 5.1. Inicialmente, na densidade de 1,7 g/cm³, foram definidos dois produtos: $d < 1,7$ (flutuado) e $d > 1,7$ (afundado). O produto afundado ($d > 1,7$) foi submetido à

separação na densidade $1,9 \text{ g/cm}^3$. Desta forma, dois novos produtos foram definidos: $1,7 < d < 1,9$ (produto flutuado) e o produto afundado ($d > 1,9$). Esta operação sequencial foi repetida nas densidades $2,2$ e $2,5 \text{ g/cm}^3$.

Figura 5.1 Sequência adotada para a separação por líquidos densos.

A Figura 5.2 ilustra a separação por líquidos densos. As partículas foram colocadas em béquer de 1 L contendo solução com densidade conhecida e agitadas levemente, em período de tempo não controlado, com bastão, auxiliando a definição do flutuado e do afundado. Em seguida, o flutuado foi retirado com um cesto e filtrado em papel filtro com auxílio de bomba de vácuo para recuperação do líquido denso. Para o afundado, o líquido denso foi separado em outro béquer sendo a fração de líquido remanescente filtrada seguindo o mesmo procedimento. Após a remoção do excesso de líquido denso, tanto o flutuado quanto o afundado foram lavados com solventes (água para a solução de cloreto de zinco e água, e álcool etílico para solução de bromofórmio e álcool etílico) para evitar a contaminação das amostras pelos líquidos densos e secos em estufa a 100°C .

Figura 5.2 Desenho esquemático que ilustra separação por líquidos densos.

As diversas frações foram divididas nos seguintes intervalos de densidade (g/cm^3): $d < 1,7$; $1,7 < d < 1,9$; $1,9 < d < 2,2$; $2,2 < d < 2,5$; e $d > 2,5$, e as massas determinadas. As duas primeiras densidades foram obtidas por dissolução de cloreto de zinco em água. As demais foram obtidas por solução de bromofórmio diluído em álcool etílico. Os valores de densidades foram ajustados pela determinação da massa da solução em um balão volumétrico com volume de 100 mL. Assim, 20 produtos para cada tipo de agregado gráudo de RCD reciclado foram obtidos, num total de 60.

5.1.3 Catação nos produtos separados por densidade

Alíquotas que correspondem à metade da massa total dos produtos da separação por densidade foram encaminhadas para a catação que foi realizada, em uma única determinação e por um único operador, com partículas espalhadas sobre uma mesa com fundo preto e iluminação natural definindo as seguintes fases (ZORDAN, 1997; ANGULO, 2000) e suas respectivas massas:

- ✓ Cimentícia (CI) – definida como a partícula que contém pasta de cimento endurecida em mais de 50% de sua superfície, com possível presença de agregados naturais (miúdo ou graúdo).
- ✓ Rocha natural (R)– definida como a partícula que contém rochas naturais em mais de 50% de sua superfície, com possível presença de pasta de cimento endurecida.
- ✓ Cerâmica vermelha (CV) – definida como a partícula que contém cerâmica vermelha, com superfície polida ou não, em mais de 50% de sua superfície, com possível presença de pasta de cimento endurecida.
- ✓ Cerâmica branca (CB) – definida como a partícula que contém cerâmica branca, com superfície polida ou não, em mais de 50% de sua superfície, com possível presença de pasta de cimento endurecida.
- ✓ Vidro (V) – definida como partícula de vidro, transparente ou opaco.
- ✓ Betume (B) – definida como partícula que contém materiais betuminosos ou uma mistura de rochas naturais e asfalto (concreto asfáltico).
- ✓ Cimento Amianto (CA) – definida como a partícula de telhas ou outros componentes construtivos de amianto.
- ✓ Outros (O) – definida como a partícula que não atende às classificações anteriores.

5.1.4 *Determinação da massa específica e absorção de água*

A massa específica aparente e absorção de água de cada uma das fases, com massa superior a 15g, nos produtos separados por densidade foram determinadas, sem repetição, bem como das alíquotas remanescentes dos produtos compostos pelo conjunto de fases.

O método empregado foi o da norma NBR 9937 (ABNT, 1987c) de agregados convencionais. As partículas foram saturadas em água por 24 horas conforme a Figura 5.3, e, em seguida, enxugadas com pano até atingir a condição

saturada superfície seca (SSS). A massa foi determinada nessa condição e também na condição submersa. Em seguida, o material foi seco em estufa a 105 °C por um período de 24 horas sendo determinada a massa seca. Nesse procedimento, foi observada desagregação nas partículas dos produtos menos densos.

Figura 5.3 Determinação da absorção de água e massa específica dos agregados graúdos de RCD reciclados: (a) saturação por 24h e (b) determinação da massa submersa através da balança hidrostática.

Os valores de absorção de água e de massa específica aparente foram determinados pelas seguintes fórmulas.

$$A(\%) = \frac{M_{sss} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad (\text{eq. 5.1})$$

$$MEA(kg/dm^3) = \frac{M_{seca}}{M_{sss} - M_{sub}} \quad (\text{eq. 5.2})$$

em que:

- A(%) é a absorção de água, expressa em porcentagem.
- M_{sss} é a massa (em kg), na condição saturada superfície seca.
- M_{seca} é a massa (em kg), secas a 105°C em estufa, durante 24 horas.
- MEA (kg/dm³) é a massa específica aparente, expressa em kg/dm³.
- M_{sub} é massa (em kg) das alíquotas, na condição submersa em água.

Essas alíquotas remanescentes dos produtos separados por densidade foram cominuídas em moinho de rolos, marca *Eberle* modelo *S90L4*, até passante em 1 mm. Alíquotas de aproximadamente 20g, num total de 60, foram secas em estufa a 105 °C, durante 24 horas. Após a secagem, essas alíquotas permaneceram, em

dessecador, durante 2 horas para se atingir equilíbrio térmico com o ambiente e foram encaminhadas para a determinação dos valores de massa específica real em picnômetro de hélio, marca Quantachrome, modelo MUP-SOC, apresentado na Figura 5.4. O volume de sólidos foi determinado pela diferença entre o volume da célula e o volume de hélio preenchido na presença dos sólidos, calculado por diferença de pressão conforme a equação 5.3.

$$V_s = V_{cel} - \left[\left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \times V_r \right] \text{ (eq. 5.3).}$$

em que:

- V_s é o volume de sólidos (em cm^3);
- V_{cel} é o volume da célula de $27,26 \text{ cm}^3$;
- P_1 é o valor da pressão (em psi) determinado após fechamento da célula pressurizada até cerca de 17 psi;
- P_2 é o valor da pressão (em psi) estabilizado após a abertura da célula;
- V_r é o volume residual (em cm^3) que não pertence à célula;

Figura 5.4 Picnômetro a gás hélio, marca Quantachrome, modelo MUP-SOC.

5.1.5 Análise química por FRX

Os produtos contidos no intervalo de separação “ $d < 1,7 \text{ g/cm}^3$ ” não foram caracterizados por serem compostos por material não-mineral. Foram assim quarteadas as alíquotas cominuídas (50 a 100 g) desses produtos para cada tipo de agregado (IT C, IT V e VI V) em 4 intervalos de densidade, num total de 48, pulverizadas conforme o item 4.1.3 e encaminhadas para análises químicas por FRX

com análise de teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 , P_2O_5 e SO_3 , além de perda ao fogo a 1050°C , nas mesmas condições do item 4.1.4.

5.1.6 Seleção de produtos separados por densidade para as demais análises

Como não existiam recursos para análise de todos os produtos, um produto de cada tipo de agregado (IT C, IT V e VI V) foi selecionado conforme resumo apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Frações granulométricas separadas por intervalos de densidade, selecionadas para os demais ensaios de caracterização.

Intervalos de densidade (kg/dm^3)	IT C	IT V	VI V
$d < 1,7$	*	*	*
$1,7 < d < 1,9$	-25,4+19,1	-19,1+12,7	-25,4+19,1
$1,9 < d < 2,2$	-12,7+9,5	-12,7+9,5	-25,4+19,1
$2,2 < d < 2,5$	-9,5+4,8	-12,7+9,5	-9,5+4,8
$d > 2,5$	-25,4+19,1	-25,4+19,1	-19,1+12,7

* Predominância de material não-mineral.

5.1.7 Análises mineralógicas

Novas alíquotas cominuídas com até 100 g desses produtos foram quarteadas, preparadas conforme o item 4.1.4 e encaminhadas para as análises mineralógicas para a identificação das fases cristalinas, empregando a difração de raios X pelo método do pó nas condições de execução e de análise apresentadas no item 4.1.6.

5.1.8 Estimativa dos teores de aglomerantes, de argilominerais e de rochas naturais

Duas alíquotas com 2,5 g desses produtos pulverizados para a FRX foram encaminhadas para a determinação, pela média, da fração solúvel em HCl 33%, seca a 100°C , estimando o teor de aglomerantes. A água de constituição dos argilominerais desses produtos foi também determinada uma única vez pela perda de massa da termogravimetria entre as temperaturas de 150 e 1.000°C no resíduo insolúvel proveniente deste ataque, e o teor dos argilominerais estimados por uma constante estequiométrica adotada de 0,09. Esse procedimento foi apresentado no item 4.1.8 e discutido no capítulo 4. As análises termogravimétricas antes do ataque com HCl e, no resíduo insolúvel, após esse ataque, foram realizadas em 1.000 mg

desses produtos pulverizados para a IRX, sem repetições, conforme as condições apresentadas no item 4.1.7.

O teor de rochas naturais foi estimado pelo complemento da soma dos teores de aglomerantes e da cerâmica vermelha, sem considerar o teor de argilominerais nessa soma. Esse procedimento não foi adotado no capítulo 4.

5.1.9 Análise estatística

A normalidade dos resultados foi verificada pelo método de Anderson-Darling. A partir do gráfico de boxes, analisou-se a distribuição dos resultados sendo a análise de variância empregada para identificar a diferença estatística significativa entre as médias das distribuições. Quando necessário, a comparação múltipla de médias foi aplicada, pelo método de Fisher (MONTGOMERY, 1997), para identificar quais dentre as distribuições apresentavam essa diferença.

5.2 Distribuição de massa nos intervalos de densidade

A Tabela 5.3 mostra as diferenças percentuais de massa após a separação por densidade com o objetivo de verificar erros experimentais indesejados como a perda de massa na manipulação com os líquidos densos e na lavagem com solventes, e a incorporação de líquidos nas frações. Essas diferenças são relacionadas tanto à perda como ao ganho de massa, inferiores, no entanto, a 5 %. Assim, na separação, a perda de massa é pequena, e a lavagem eficiente para remover grande parte dos líquidos densos nas partículas porosas.

Tabela 5.3 Diferenças percentuais de massa nas frações granulométricas dos agregados graúdos de RCD reciclados após a separação por densidade.

Frações granulométricas (em mm)	Massa total (em g)						Diferença de massa (%)		
	Antes da separação			Após a separação					
	IT C	IT V	VI V	IT C	IT V	VIV	IT C	IT V	VIV
-25,4+19,1	3.293	3.262	4.642	3.233	3.227	4.836	- 1,8	- 1,1	+ 4,2
-19,1+12,7	2.243	3.200	3.818	2.202	3.116	3.955	- 1,8	- 2,6	+ 3,6
-12,7+9,5	1.881	1.508	3.276	1.848	1.484	3.454	- 1,8	- 1,6	+ 5,4
-9,5+4,8	1.375	2.001	2.636	1.352	1.916	2.712	- 1,7	- 4,3	+ 2,9

A Figura 5.5 mostra a distribuição em massa nas frações granulométricas dos agregados graúdos de RCD reciclados contidas nos intervalos de separação por líquidos densos. Os produtos de densidade “ $d < 1,7 \text{ g/cm}^3$ ” representam menos de 1%

da massa nas diferentes frações granulométricas e origem dos agregados graúdos de RCD reciclados. As massas dos produtos de densidade “ $1,7 < d < 1,9$ ” reduzem com a diminuição do tamanho da partícula. Os teores de massa dos agregados de Vinhedo nesse intervalo podem atingir até 19,6%, diferentemente dos agregados de Itaquera em que os teores de massa não foram superiores a 4,0%. Grande parte da massa está nos produtos de densidade “ $d > 1,9$ ”. No caso dos agregados de Vinhedo, as massas desses produtos não apresentam tendência clara em função do tamanho da partícula. Já nos agregados de Itaquera, os teores de massa dos produtos “ $1,9 < d < 2,2$ ” reduzem à medida que a partícula diminui de tamanho, acompanhado do aumento nos produtos mais densos. Nesse caso, a diferença na distribuição de massa nos produtos de densidade entre a fração retida e passante em peneira de abertura de malha 12,7 mm é significativa.

Figura 5.5 Distribuição de massa nos diversos intervalos de densidade para as frações granulométricas dos agregados graúdos de RCD reciclados: a) IT V, b) IT C e c) VI V.

A Figura 5.6 mostra comparativamente a distribuição em massa ponderada nos diversos intervalos de densidade para os agregados graúdos de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V.

Figura 5.6 Distribuição de massa ponderada nos diversos intervalos de densidade para os agregados graúdos de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V.

As distribuições em massa nos intervalos de densidade dos agregados graúdos de RCD reciclados de Itaquerá (tipo C e V) são bastante semelhantes. Assim, a classificação do RCD mineral realizada na usina de reciclagem não foi eficiente para melhorar essa distribuição. Existe uma grande diferença nessa distribuição em função da origem: agregados de Itaquerá ou de Vinhedo. A diferença na massa média com densidade superior a 2,2 g/cm³ é superior a 30%, sendo que o agregado de Itaquerá apresenta maiores proporções de massa junto aos produtos de maior densidade.

5.3 Distribuição de fases e as propriedades físicas nos intervalos de densidade

No intervalo de densidade “ $d < 1,7$ ”, os teores médios de materiais não minerais (madeira, betume, etc.) nos agregados graúdos reciclados do RCD vermelho (IT V e VI V) ultrapassam 90% da massa. Já, no agregado do RCD cinza (IT C), não foi possível distinguir claramente se a fração mineral, que correspondeu a 80% da massa, era proveniente da fase “cimentícia” ou “cimento amianto”. A Figura 5.7 mostra que as fases minerais são predominantes nos agregados graúdos de RCD

reciclados contidos nos demais intervalos de densidade. As fases “cimentícia” e “betume”, compostas por partículas mistas de ligante e de rochas naturais, estão presentes em todos os intervalos de densidade.

Figura 5.7 Teores médios das fases dos agregados graúdos de RCD reciclados de IT V, IT C e VI V nos intervalos de densidade “ $d > 1,7$ ”. Legenda: R- rochas; CI – cimentícia; CV – cerâmica vermelha; CB – cerâmica branca; CA -cimento amianto; B- betume; e O-outros.

No intervalo de densidade “ $1,7 < d < 1,9$ ”, foi identificado até 10 % em massa de fases indesejáveis para o uso como agregados, tais como cimento amianto (CA) e

betume (B). Mesmo que o cimento amianto seja adequadamente triado, os teores elevados de betume não são indicados para uso como agregados. No entanto, aproximadamente 85% da massa desse intervalo é composta pela fase “cimentícia” (CI) e “cerâmica vermelha” (CV). A média dos conteúdos de cerâmica vermelha do agregado de VI V é superior à média dos conteúdos dos agregados de IT C e IT V; este aumento também é acompanhado pela redução dos conteúdos da fase cimentícia. Como os teores de cerâmica vermelha porosa são superiores a 20% da massa, esse intervalo não pode ser utilizado como agregados para concreto, conforme DIN (2002).

No intervalo de densidade “ $1,9 < d < 2,2$ ”, os teores da fase “cimento amianto” apresentaram valores abaixo de 5% em massa. Os conteúdos de cerâmica vermelha não ultrapassaram 25% da massa, e a média dos teores da fase “cimentícia” aumentou para valores superiores a 67% da massa. Essa composição de fases permite classificar algumas das frações contidas no intervalo como agregados de resíduos mistos para uso em concretos pela DIN (2002), quando os teores de cerâmica vermelha porosa estiverem abaixo de 20 %.

No intervalo de densidade “ $d > 2,2$ ”, não foi identificada a fase “cimento amianto” (CA). No intervalo “ $2,2 < d < 2,5$ ”, a média dos teores da fase cimentícia (CI) manteve-se em valores semelhantes aos produtos de densidade “ $1,9 < d < 2,2$ ”, entre 70 e 90% em massa. Os conteúdos da fase “rocha” (R) atingiram até 10% em massa ao passo que os conteúdos da cerâmica vermelha (CV) não ultrapassaram 11%. A média dos teores da cerâmica vermelha do agregado de IT C é inferior à média dos agregados de IT V e VI V. Essa composição de fases permite classificar o intervalo como agregados de resíduos de edificações para uso em concretos pela DIN (2002), uma vez que os teores de cerâmica vermelha pouco porosa estão abaixo de 30 %.

No intervalo “ $d > 2,5$ ”, os conteúdos da fase “rocha” (R) aumentaram para valores superiores a 80% em massa enquanto que os da fase “cimentícia” (CI) caíram para até 16 % em massa. Não foram identificadas as fases cerâmica vermelha (CV) e cerâmica branca (CB). Essa composição de fases permite classificar o intervalo como agregados de resíduos de concreto pela DIN (2002) para uso em concretos, uma vez que os teores de cerâmica vermelha pouco porosa estão abaixo de 10%.

A Figura 5.8 mostra os teores médios das fases principais nos agregados graúdos de RCD reciclados em função da mediana do intervalo de densidade. Os teores médios de “cerâmica vermelha”, por ser mais porosa (ver Tabela 5.4) que a fase “rocha” (ver Tabela 5.5), aumentam nos intervalos menos densos, “ $d < 2,2$ ”. A absorção de água da fase “cerâmica vermelha” variou de 8,7 a 32,4%, enquanto que a da fase “rocha” variou de 0,6 a 7,2%. Existe uma tendência de redução nesses teores em função do aumento da mediana do intervalo de densidade.

Figura 5.8 Teores médios das diversas fases nos produtos das separações por densidade de IT C, IT V e VI V em função da mediana do intervalo de densidade.

Já os teores de “rocha” aumentam, especialmente a partir do intervalo “ $d > 2,5$ ” onde os teores médios da fase “cimentícia” não são tão representativos como nos demais intervalos e inferiores a 20% da massa. Nesse intervalo, a fase “cimentícia” é mais porosa (ver Tabela 5.6) que a fase “rocha”, pois a absorção de água para essas fases variou de 2,2 a 8,8%, e de 0,6 a 2,5%, respectivamente.

Apesar disso, foi encontrada pasta de cimento aderida na fase “rocha” assim como rochas naturais aderidas na fase “cimentícia”. No intervalo de densidade “ $2,2 < d < 2,5$ ”, a fase “rocha” pode ser tão porosa quanto a fase “cimentícia”, variando de 1,7 a 7,2%, e de 4,7 a 8,3%, respectivamente. Em alguns casos, foram encontradas rochas com pequena quantidade de pasta de cimento aderida no intervalo de densidade “ $2,2 < d < 2,5$ ”, o que indica a existência de agregados naturais mais porosos.

Tabela 5.4 Valores de massa específica aparente e absorção de água da cerâmica vermelha nas frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.

Origem do agregado	Fração granulométrica (mm)	Intervalo de densidade (g/cm ³)					
		2,2 < d < 2,5		1,9 < d < 2,2		1,7 < d < 1,9	
		Absorção (%)	MEA (kg/dm ³)	Absorção (%)	MEA (kg/dm ³)	Absorção (%)	MEA (kg/dm ³)
IT C	-25,4+19,1	**		**	**	21,3	1,66
	-19,1+12,7	nd	nd	**	**	32,4	1,53
	-12,7+9,5	**		**	**	25,1	1,61
	-9,5+4,8	**	**	**	**	21,3	1,81
IT V	-25,4+19,1	13,5	1,97	16,4	1,82	**	**
	-19,1+12,7	16,8	1,77	17,5	1,78	25,7	1,54
	-12,7+9,5	16,0	1,87	20,6	1,73	**	**
	-9,5+4,8	14,1	1,97	18,6	1,75	**	**
VI V	-25,4+19,1	8,7	2,12	16,4	1,83	29,2	1,48
	-19,1+12,7	11,7	1,98	16,3	1,81	19,2	1,67
	-12,7+9,5	15,3	1,88	18,6	1,76	26,3	1,58
	-9,5+4,8	14,6	1,86	17,2	1,77	26,2	1,53
Média		13,8	1,93	17,7	1,78	25,2	1,60
Máximo		16,8	2,12	20,6	1,83	32,4	1,81
Mínimo		8,7	1,77	16,3	1,73	19,2	1,48

nd – não detectado.

** Não determinado. O valor de massa foi inferior a 15 g.

Tabela 5.5 Valores de massa específica aparente e absorção de água da fase rocha nas frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.

Origem do agregado	Fração granulométrica (mm)	Intervalo de densidade (g/cm ³)			
		d > 2,5		2,2 < d < 2,5	
		Absorção (%)	MEA (kg/dm ³)	Absorção (%)	MEA (kg/dm ³)
IT C	-25,4+19,1		2,78	**	
	-19,1+12,7	1,0	2,63	4,2	2,13
	-12,7+9,5		2,72	3,9	
	-9,5+4,8	1,9	2,64	7,2	2,22
IT V	-25,4+19,1	0,7	2,62	nd	nd
	-19,1+12,7			nd	nd
	-12,7+9,5	1,0	2,60	nd	nd
	-9,5+4,8	0,8	2,61	nd	nd
VI V	-25,4+19,1	1,2	2,66	nd	nd
	-19,1+12,7		2,64	**	
	-12,7+9,5	1,6	2,81	1,7	2,50
	-9,5+4,8	1,5	2,60	3,1	2,48
Média		1,3	2,66	4,0	2,34
Máximo		2,5	2,81	7,2	2,50
Mínimo		0,6	2,60	1,7	2,13

nd – não detectado

** Não determinado. O valor de massa foi inferior a 15 g.

Tabela 5.6 Valores de massa específica aparente e absorção de água da fase “cimentícia” nas frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.

Origem	Fração (mm)	Intervalo de densidade (g/cm ³)							
		d > 2,5		2,2 < d < 2,5		1,9 < d < 2,2		1,7 < d < 1,9	
		Abs. (%)	MEA (kg/dm ³)	Abs. (%)	MEA (kg/dm ³)	Abs. (%)	MEA (kg/dm ³)	Abs. (%)	MEA (kg/dm ³)
IT C	-25,4+19,1			4,7		7,2	2,05	12,0	
	-19,1+12,7	3,3	2,47	6,1	2,17	10,9	1,95	14,1	1,82
	-12,7+9,5			7,4		7,7	1,99	**	
	-9,5+4,8	4,4	2,50	7,0	2,11	9,6	2,01	**	**
IT V	-25,4+19,1	**	**	4,8	2,27	8,2	1,97	20,1	1,62
	-19,1+12,7			4,8		7,7	2,01	15,1	
	-12,7+9,5	3,4	2,43	8,3	2,10	8,3	2,00	8,0	1,77
	-9,5+4,8	2,6	2,43	6,9	2,10	9,4	2,09	15,5	1,74
VI V	-25,4+19,1	7,8	2,19	5,8	2,18	8,7	1,94	18,0	1,67
	-19,1+12,7		**	6,7		8,0	1,97	12,7	
	-12,7+9,5	nd	nd	6,8	2,10	10,8	1,93	**	**
	-9,5+4,8	nd	nd	6,2	2,19	8,8	1,99	**	**
Média		4,5	2,44	6,3	2,17	8,8	1,99	14,4	1,74
Máximo		8,8	2,55	8,3	2,27	10,9	2,09	20,1	1,84
Mínimo		2,2	2,19	4,7	2,10	7,2	1,93	8,0	1,62

** Valor não determinado. O valor de massa foi inferior a 15 g.

A variação nas propriedades físicas das fases “cerâmica vermelha” e “cimentícia” apresentadas na Tabela 5.4 e Tabela 5.6 confirma a hipótese fundamentada neste capítulo sobre a ineficiência do método da catação de fases. A massa específica aparente e absorção de água da fase “cerâmica vermelha” variaram de 1,48 a 2,12 kg/dm³, e de 8,7% a 32,4%, respectivamente. A massa específica aparente e absorção de água da fase “cimentícia” variaram de 1,62 a 2,55 kg/dm³, e de 2,2% a 20,1%, respectivamente.

A Figura 5.9 mostra a distribuição dos valores (mínimos-médias-máximos) de massa específica aparente das fases separadas por densidade. Os valores da fase “rocha” são próximos aos valores de densidade estabelecidos pelos intervalos. Já os valores da fase “cimentícia” e “cerâmica vermelha” não coincidem com os valores de densidade estabelecidos pelos intervalos.

A distribuição dos valores de massa específica aparente da fase “cimentícia” no intervalo “1,7 < d < 1,9” (1,62-1,84 kg/dm³) se sobrepõe à distribuição desses valores da fase “cerâmica vermelha” no intervalo “1,9 < d < 2,2” (1,73-1,83 kg/dm³). O mesmo ocorre para os valores da fase “cimentícia” no intervalo “1,9 < d < 2,2”

(1,93-2,09 kg/dm³) e para os valores da fase “cerâmica vermelha” no intervalo “2,2< d< 2,5” (1,77-2,12 kg/dm³).

Figura 5.9 Distribuição dos valores (mínimos-médias-máximos) de massa específica aparente das fases separadas por densidade. Em verde: valores de densidade no intervalo.

No entanto as distribuições de cada fase separada por densidade seguem uma distribuição normal, conforme os dados apresentados no Apêndice D, e são distintas entre si, por apresentarem diferenças estatísticas significativas entre as médias. Isso comprova que, apesar da sobreposição de valores entre as fases, a separação por líquidos densos é eficiente para separar cada fase individual em subgrupos com propriedades físicas distintas.

A Tabela 5.7 mostra os valores de massa específica aparente e absorção de água nos produtos das separações por densidade que representam a média ponderada das fases contidas em um mesmo intervalo de separação. Esse efeito de sobreposição nos valores de massa específica aparente é minimizado, visto que as distribuições desses valores nos diversos intervalos de densidade (ver Figura 5.10) seguem uma distribuição normal, conforme os dados apresentados no Apêndice D. Essas distribuições são distintas entre si e apresentam diferenças estatísticas significativas entre as médias, apesar de não coincidirem com os valores de densidade

estabelecidos pelos intervalos menos densos ($d < 2,5$), visto que a absorção dos líquidos densos pelas partículas porosas aumenta a sua densidade, fazendo com que elas afundem em líquidos de densidade maior.

Tabela 5.7 Valores de massa específica aparente e absorção de água nas frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.

Origem	Fração (mm)	Intervalo de densidade (g/cm^3)							
		$d > 2,5$		$2,2 < d < 2,5$		$1,9 < d < 2,2$		$1,7 < d < 1,9$	
		Abs. (%)	MEA (kg/dm^3)	Abs. (%)	MEA (kg/dm^3)	Abs. (%)	MEA (kg/dm^3)	Abs. (%)	MEA (kg/dm^3)
IT C	-25,4+19,1	0,7	2,60	3,8	2,34	7,1	2,03	17,9	1,77
	-19,1+12,7	1,8	2,59	3,9	2,18	6,4	1,99	18,5	1,73
	-12,7+9,5	1,1	2,63	5,5	2,15	6,5	1,93	21,9	1,66
	-9,5+4,8	1,3	2,60	7,0	2,11	10,5	1,95	32,7	1,50
IT V	-25,4+19,1	0,9	2,62	7,1	2,14	11,6	1,99	25,9	1,50
	-19,1+12,7	0,6	2,55	7,4	2,12	11,8	2,02	23,9	1,61
	-12,7+9,5	0,3	2,59	8,2	2,12	14,7	1,98	25,1	1,59
	-9,5+4,8	1,3	2,60	7,6	2,15	9,4	1,88	27,3	1,52
VI V	-25,4+19,1	1,3	2,61	4,3	2,27	7,9	1,93	20,7	1,70
	-19,1+12,7	1,4	2,62	6,9	2,24	9,2	1,90	20,7	1,72
	-12,7+9,5	1,0	2,67	6,4	2,15	10,3	1,83	22,0	1,71
	-9,5+4,8	1,1	2,58	7,4	2,09	10,5	1,96	23,7	1,62
Média		1,1	2,61	6,3	2,17	9,7	1,95	23,4	1,64
Máximo		1,8	2,67	8,2	2,34	14,7	2,03	32,7	1,77
Mínimo		0,3	2,55	3,8	2,09	6,4	1,83	17,9	1,50

Figura 5.10 Distribuição dos valores (mínimos-médias-máximos) de massa específica aparente nas frações granulométricas separadas por densidade. Em verde: valores de densidade no intervalo.

Os produtos de densidade “ $1,7 < d < 1,9$ ” não podem ser utilizados como agregados reciclados em concretos, conforme a especificação da RILEM (RILEM

RECOMMENDATION, 1994), por não atenderem aos valores limites estabelecidos para as propriedades físicas. Já os produtos de densidade “ $1,9 < d < 2,2$ ” podem ser utilizados como agregados em concretos com resistência mecânica de até 20 MPa. Os produtos de densidade “ $d > 2,2$ ” podem ser utilizados como agregados em concretos estruturais, com resistência mecânica de até 60 MPa. Como de 40 a 70% da massa dos agregados graúdos de RCD reciclados está contida nesse intervalo, o beneficiamento mineral por meio das operações unitárias de concentração gravítica pode ser empregado, com o objetivo de melhorar a qualidade do agregado reciclado para o uso em concretos.

O erro ocasionado pela absorção dos líquidos densos por meio de partículas porosas na separação por densidade é constante para as fases separadas por densidade, bem como seus produtos que são compostos pela média ponderada de diversas fases, visto que é possível estabelecer uma correlação linear positiva entre os valores médios de massa específica aparente após a separação e as medianas dos intervalos de densidade, conforme a Figura 5.11¹⁵.

Figura 5.11 Correlação linear positiva entre os valores médios de massa específica aparente das fases (a) e dos produtos, média ponderada das fases, (b) separados por densidade e as medianas dos intervalos de densidade.

¹⁵ O limite superior do intervalo “ $d > 2,5$ ” foi determinado pela média da massa específica real das frações neste intervalo, 2,7 kg/dm³ (ver Tabela 5.8).

A Figura 5.12 mostra a correlação exponencial entre os valores de massa específica aparente e absorção de água das fases e das frações separadas por densidade. Essas propriedades são variáveis dependentes. A fase “cimentícia” e a fase “rocha” apresentam a mesma tendência na correlação exponencial. Já a correlação da fase “cerâmica vermelha” é distinta dessas fases. A dispersão de resultados da fase “cimentícia” está associada à diferença na qualidade da pasta de cimento ou cal endurecida.

Figura 5.12 Correlação exponencial entre os valores de massa específica aparente e de absorção de água das fases (a) e dos produtos (b) separados por densidade.

A Tabela 5.8 mostra os valores de massa específica real dos produtos separados por densidade. Eles não variaram em função do intervalo de densidade, demonstrando que não existe uma variação perceptível das espécies químicas principais da composição química nos intervalos de densidade.

Tabela 5.8 Valores de massa específica real (kg/dm³) das frações granulométricas de cada tipo de agregado separadas por densidade.

Origem dos agregados	Frações granulométricas (mm)	Produtos das separações por densidade (g/cm ³)							
		1,7<d<1,9		1,9<d<2,2		2,2<d<2,5		d>2,5	
		M	DP	M	DP	M	DP	M	DP
IT C	-25,4+19,1	2,76	0,02	2,59	0,03	2,75	0,04	2,74	0,04
	-19,1+12,7	2,65	0,01	2,65	0,01	2,65	0,02	2,75	0,04
	-12,7+9,5	2,70	0,03	2,64	0,01	2,70	0,03	2,70	0,01
	-9,5+4,8	*	*	2,57	0,04	2,62	0,02	2,72	0,04
IT V	-25,4+19,1	2,62	0,02	2,62	0,02	2,64	0,02	2,67	0,04
	-19,1+12,7	2,74	0,04	2,69	0,02	2,62	0,03	2,70	0,01
	-12,7+9,5	2,66	0,03	2,67	0,02	2,63	0,01	2,71	0,03
	-9,5+4,8	2,64	0,02	2,67	0,04	2,62	0,01	2,72	0,04
VI V	-25,4+19,1	2,64	0,03	2,62	0,01	2,59	0,02	2,63	0,02
	-19,1+12,7	2,60	0,01	2,65	0,03	2,62	0,02	2,67	0,02
	-12,7+9,5	2,67	0,01	2,61	0,02	2,67	0,03	2,70	0,02
	-9,5+4,8	*	*	2,67	0,03	2,64	0,03	2,67	0,01
Média		2,67	-	2,64	-	2,65	-	2,70	-

* Massa insuficiente para a realização do ensaio.

5.4 Análise química por FRX

A Tabela 5.9 mostra os teores dos óxidos dos produtos separados no intervalo “1,7< d< 2,2”. No intervalo “1,7< d< 1,9”, o teor de SO₃ na fração “IT C -9,5+4,8 mm” é elevado acompanhado do aumento significativo da perda ao fogo, originados de fases anidras ou hidratadas de sulfato de cálcio ou de algum erro experimental. Não foi possível realizar uma análise mineralógica nessa fração em função da pouca massa disponível. Os teores de Fe₂O₃ (4,48-5,34 %) aumentaram e os teores de CaO (1,6-6,8%) diminuíram nas frações de VI V se comparado com as frações de IT C e IT V (2,14-4,18% e 4,1-18,3%, respectivamente) o que pode ser explicado pelo aumento significativo do teor da fase “cerâmica vermelha” e redução do teor da fase “cimentícia” nestas frações em relação às demais. No intervalo “1,9< d< 2,2”, os teores de CaO (de 9,9 a 11,6%) das frações de IT C são superiores aos das demais frações por causa do aumento significativo do teor da fase “cimentícia” nestas frações em relação às demais.

Tabela 5.9 Teores dos óxidos dos produtos separados no intervalo “1,7<d<2,2”.

	Origem	Fração (mm)	Teores dos óxidos (% em massa)								
			S+A+F	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF	Total
1,7<d<1,9	IT C	-25,4+19,1	72,0	7,6	1,4	2,7	0,3	0,1	0,2	15,9	100,4
		-19,1+12,7	51,8	18,3	2,6	1,8	0,2	2,4	0,4	23,2	100,8
		-12,7+9,5	64,9	6,3	1,6	2,5	0,8	0,1	<0,1	24,7	101,0
		-9,5+4,8	38,2	10,8	1,4	2,1	0,4	<0,1	7,4	40,3	100,6
	IT V	-25,4+19,1	59,0	7,5	1,4	2,7	0,5	0,1	0,3	27,7	99,3
		-19,1+12,7	53,9	11,1	2,2	2,5	0,5	0,2	0,4	29,5	100,4
		-12,7+9,5	70,7	4,1	1,3	2,6	0,7	0,1	0,1	20,8	100,4
		-9,5+4,8	61,7	7,6	1,4	2,8	0,5	0,1	0,2	24,9	99,3
	VI V	-25,4+19,1	70,3	2,9	0,7	3,2	0,9	0,1	<0,1	22,1	100,2
		-19,1+12,7	73,9	1,6	0,6	3,5	0,9	0,1	<0,1	19,9	100,5
		-12,7+9,5	65,1	3,7	1,0	3,3	0,8	0,1	<0,1	22,5	96,6
		-9,5+4,8	59,0	6,8	1,5	3,1	1,1	0,1	<0,1	23,6	95,2
	Média		61,7	7,4	1,4	2,7	0,6	0,3	1,3	24,6	
	Máximo		73,9	18,3	2,6	3,5	1,1	2,4	7,4	40,3	
	Mínimo		38,2	1,6	0,6	1,8	0,2	0,1	0,1	15,9	
1,9<d<2,2	IT C	-25,4+19,1	74,0	9,9	1,2	2,6	0,3	<0,1	0,4	10,9	99,2
		-19,1+12,7	72,1	10,9	1,5	2,2	0,3	<0,1	0,4	12,0	99,4
		-12,7+9,5	68,4	11,1	1,8	2,2	0,4	<0,1	0,4	14,9	99,3
		-9,5+4,8	69,9	11,6	1,2	2,1	0,3	<0,1	0,5	13,5	99,0
	IT V	-25,4+19,1	75,4	7,2	1,1	4,4	0,4	0,1	0,4	10,4	99,4
		-19,1+12,7	76,4	7,2	1,0	3,5	0,4	0,1	0,3	11,8	100,7
		-12,7+9,5	73,9	8,3	1,0	3,0	0,3	<0,1	0,3	12,5	99,3
		-9,5+4,8	77,4	3,6	0,7	3,7	0,3	<0,1	0,2	13,6	99,6
	VI V	-25,4+19,1	75,8	7,6	1,2	1,7	0,4	<0,1	0,3	12,4	99,3
		-19,1+12,7	73,9	8,1	1,3	1,7	0,4	<0,1	0,3	13,6	99,3
		-12,7+9,5	72,6	7,5	1,4	2,0	0,5	<0,1	0,3	15,6	99,9
		-9,5+4,8	75,3	6,8	1,2	2,0	0,6	<0,1	0,2	13,5	99,6
	Média		73,8	8,3	1,2	2,6	0,4	0,1	0,3	12,9	
	Máximo		77,4	11,6	1,8	4,4	0,6	0,1	0,5	15,6	
	Mínimo		68,4	3,6	0,7	1,7	0,3	0,1	0,2	10,4	

S+A+F significa a soma dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃.

A Tabela 5.10 mostra os teores dos óxidos dos produtos separados no intervalo “d> 2,2”. No intervalo “2,2< d< 2,5”, os teores de CaO (de 7,3 a 9,0%) das frações de IT C são superiores aos das demais frações, que podem ser explicados pelo aumento significativo do teor da fase “cimentícia” nestas em relação às demais. No intervalo “d> 2,5”, os teores de CaO (1,0-2,2% das frações de VI V são inferiores aos das demais frações desta vez justificados pelos conteúdos baixos de fase “cimentícia” nestas frações em relação às demais.

Tabela 5.10 Teores dos óxidos dos produtos separados no intervalo “d > 2,2”.

	Origem	Fração (mm)	Teores dos óxidos (% em massa)								
			S+A+F	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PF	Total
2,2 < d < 2,5	IT C	-25,4+19,1	76,9	8,4	1,5	4,6	0,4	0,1	0,3	7,9	100,2
		-19,1+12,7	79,6	7,3	1,0	3,9	0,4	0,1	0,3	7,2	99,9
		-12,7+9,5	75,8	8,7	1,3	3,3	0,3	0,1	0,5	9,7	99,5
		-9,5+4,8	75,7	9,0	1,0	3,0	0,3	<0,1	0,4	10,0	99,3
	IT V	-25,4+19,1	81,3	3,6	1,0	6,9	0,4	0,2	<0,1	6,8	100,0
		-19,1+12,7	78,8	5,2	1,0	6,5	0,4	0,2	<0,1	8,2	100,2
		-12,7+9,5	80,6	4,8	0,9	6,1	0,4	0,2	<0,1	7,1	100,1
		-9,5+4,8	82,2	3,6	1,2	3,8	0,4	0,1	0,2	9,1	100,5
	VI V	-25,4+19,1	82,8	4,5	0,8	3,6	0,3	<0,1	0,2	7,1	99,5
		-19,1+12,7	80,8	5,1	0,7	4,0	0,3	<0,1	0,2	8,3	99,4
		-12,7+9,5	80,4	4,6	0,8	4,0	0,4	<0,1	0,2	9,3	99,7
		-9,5+4,8	80,3	5,3	0,8	4,1	0,4	<0,1	0,2	8,1	99,0
	Média		79,6	5,8	1,0	4,5	0,4	0,1	0,3	8,2	
	Máximo		82,8	9,0	1,5	6,9	0,4	0,2	0,5	10,0	
	Mínimo		75,7	3,6	0,7	3,0	0,3	0,1	0,2	6,8	
d > 2,5	IT C	-25,4+19,1	81,5	5,4	1,6	6,2	0,7	0,3	0,2	3,5	99,4
		-19,1+12,7	79,3	6,2	1,5	6,4	0,6	0,3	0,1	4,5	98,9
		-12,7+9,5	82,0	4,8	1,2	6,9	0,6	0,2	0,1	3,4	99,2
		-9,5+4,8	79,3	5,8	1,5	6,7	0,5	0,2	0,2	5,5	99,6
	IT V	-25,4+19,1	78,3	10,0	1,8	2,4	0,4	<0,1	0,4	5,4	98,8
		-19,1+12,7	76,3	13,0	2,1	2,3	0,3	<0,1	0,4	3,8	98,4
		-12,7+9,5	76,7	13,0	2,2	2,3	0,6	0,1	0,3	4,9	100,1
		-9,5+4,8	83,8	4,6	1,2	3,0	1,2	0,2	0,3	4,6	98,8
	VI V	-25,4+19,1	88,0	1,0	0,8	7,0	0,4	<0,1	<0,1	2,7	99,9
		-19,1+12,7	85,9	1,9	1,3	6,9	0,6	0,1	<0,1	3,2	100,1
		-12,7+9,5	85,7	2,2	1,7	6,4	0,7	0,2	<0,1	3,1	100,0
		-9,5+4,8	87,1	1,9	0,9	6,2	0,3	<0,1	<0,1	3,2	99,7
	Média		82,0	5,8	1,5	5,2	0,6	0,2	0,3	4,0	
	Máximo		88,0	13,0	2,2	7,0	1,2	0,3	0,4	5,5	
	Mínimo		76,3	1,0	0,8	2,3	0,3	0,1	0,1	2,7	

S+A+F significa a soma dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃.

A Figura 5.13a mostra que a correlação linear inversa entre a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ que representa os silicatos das rochas naturais e das cerâmicas, e a soma dos teores de CaO e da perda ao fogo que representa indiretamente os aglomerantes e os argilominerais, continua válida para os produtos separados por densidade, e semelhante à correlação encontrada nas frações granulométricas caracterizadas do capítulo 4, representada pela linha tracejada, sendo uma média ponderada dos diversos intervalos de densidade.

Nos intervalos “1,7 < d < 2,2”, como os teores de argilominerais são mais representativos, a correlação da soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ com o teor

de CaO não é tão significativa, conforme ilustra a Figura 5.13b. Já no intervalo “d>2,2”, essa correlação é expressiva.

Figura 5.13 Correlação linear inversa (linha contínua) entre a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ e a soma dos teores de CaO e da perda ao fogo (a) e entre a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ e a o teor de CaO (b) para os produtos separados por densidade.

Como a fração graúda foi lavada durante a separação por densidade, o solo que possivelmente se adere à fração graúda não está mais presente. Além disso, os teores de argilominerais diminuem à medida que aumenta o intervalo de densidade, não estando, portanto, associados principalmente à presença da fase “rocha”. Assim, grande parte dos argilominerais presentes é proveniente da fase “cerâmica vermelha”.

Os teores de CaO foram semelhantes nos diferentes produtos de separação por densidade, variando de 1,0 a 18,0%, não existindo uma tendência definida de redução nesses teores em função do aumento da mediana do intervalo, conforme Figura 5.14a.

No entanto a soma dos teores de CaO e da perda ao fogo, que representa indiretamente o teor de aglomerantes e dos argilominerais, aumentou exponencialmente com a redução da mediana do intervalo de densidade (Figura 5.14b). Essa tendência foi mais definida quando se utilizaram somente os valores de perda ao fogo, reduzindo a influência dos aglomerantes e aumentando a dos

argilominerais. Nesse caso, a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 que representa indiretamente os silicatos das rochas naturais e das cerâmicas reduz, conforme a Figura 5.14c.

São sistematicamente superiores as somas dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , nos dois intervalos mais densos, verificando-se também a redução na soma dos teores de perda ao fogo e de cálcio.

Figura 5.14 Comparação entre os teores dos óxidos nos produtos separados por densidade: a) soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , b) teores de CaO, c) soma dos teores de CaO e perda ao fogo e d) perda ao fogo.

5.5 *Análise mineralógica por DRX*

As Figura 5.15 e Figura 5.16 mostram os difratogramas dos produtos selecionados nos intervalos de densidade. Após essa separação, as fases cristalinas hidratadas da pasta de cimento ou de cal foram identificadas em todos os intervalos de densidade comprovando que, embora não detectadas no capítulo 4, elas estão presentes. No intervalo “ $1,7 < d < 2,2$ ”, os tipos de argilominerais identificados foram merlinoita, illita, muscovita e montmorilonita e mudaram em função da origem do agregado, e em função do intervalo de densidade para o agregado de mesma origem. No intervalo “ $d > 2,2$ ”, os argilominerais identificados foram flogopita, merlinoita e muscovita. Os tectosilicatos¹⁶, tais como quartzo e feldspato potássico (ortoclásio e microclínio), estão também presentes em todos os intervalos de densidade. Os feldspatos potássicos (ortoclásio e microclínio) que representam a fase “rocha” estão presentes em todos os intervalos de densidade, no entanto a contagem aumenta à medida que o intervalo de separação se torna mais denso, incluindo a detecção da fase albita apenas nos dois intervalos mais densos.

¹⁶ Tectosilicatos são minerais compostos por tetraedros de SiO_4 interconectados que formam uma estrutura tridimensional (<http://mineral.galleries.com/minerals/silicate/tectosil.htm>).

Figura 5.15 Difractogramas dos produtos selecionados no intervalo de densidade “1,7<d<2,2”, selecionados. Legenda: Mn- montmorilonita; Il – ilita; Me – merlionita; Mu- muscovita; Il- ilita; Hi – hidrocalumita; CSH – silicato de cálcio hidratado; B - bassanita; D – dolomita; C- calcita; Si – sílica; Q –quartzo; Mi – microclínio; O – ortoclásio; An – antigorita.

Figura 5.16 Difrátogramas dos produtos selecionados no intervalo de densidade “ $d > 2,2$ ”.
Legenda: F-flogopita; Me – merlionita; Mu -muscovita; Hi – hidrocalumita; R – rosenhaita;
 CSH – silicato de cálcio hidratado; S –scawtita; C- calcita; Si – sílica; Mi – microclínio; O-
 ortoclásio; Al- albita; An – antigorita.

5.6 Estimativa dos aglomerantes, dos argilominerais e das rochas

A Tabela 5.11 mostra a estimativa dos teores de aglomerantes, de argilominerais e de rochas nos produtos selecionados nos intervalos de densidade. O produto de densidade “ $d > 2,5$ ” não contém cerâmica vermelha, no entanto o teor de argilominerais atingiu até 10%. Parte dos argilominerais é proveniente das rochas naturais que representam mais de 70% da massa dos produtos no intervalo “ $d > 2,2$ ”. Os teores de argilominerais no intervalo “ $1,7 < d < 2,2$ ” aumentam significativamente (11,1-40,0%), assim como os teores de cerâmica vermelha (7,5-78,9%). Para os agregados vermelhos do intervalo “ $1,7 < d < 1,9$ ”, os argilominerais são predominantemente originados da cerâmica vermelha. Eles podem representar em torno de 50% da cerâmica vermelha. O apêndice C apresenta análises termogravimétricas da fase cerâmica vermelha nos intervalos “ $2,2 < d < 2,5$ ”. Nesse caso, os teores de argilominerais variaram de 21,1 a 30,7%.

Tabela 5.11 Estimativa dos teores (% em massa) dos aglomerantes, dos argilominerais e das rochas nos produtos selecionados nos intervalos de densidade.

Intervalo de densidade (g/cm ³)	Origem	Fração (mm)	RI _{100°C} (%)	H ₂ O ₍₂₎ (%)	K	A (%)	AR (%)	CV (%)	RO (%)
1,7<d<1,9	IT C	-25,4+19,1	71,0	1,7	0,09	29,0	18,9	13,7	57,3
	IT V	-19,1+12,7	52,4	2,4	0,09	47,6	26,7	46,1	6,3
	VI V	-25,4+19,1	74,0	3,6	0,09	26,0	40,0	78,9	0,0
	Média					34,2	28,5	46,2	21,2
1,9<d<2,2	IT C	-12,7+9,5	64,5	1,4	0,09	35,5	15,6	7,5	57,0
	IT V	-12,7+9,5	67,5	1,0	0,09	32,5	11,1	11,7	55,8
	VI V	-25,4+19,1	73,6	1,2	0,09	26,4	13,3	15,9	57,7
	Média					31,5	13,3	11,7	56,8
2,2<d<2,5	IT C	-9,5+4,8	76,1	0,8	0,09	23,9	8,9	2,2	73,9
	IT V	-12,7+9,5	78,1	0,7	0,09	21,9	7,8	9,8	68,3
	VI V	-9,5+4,8	81,0	0,8	0,09	19,0	8,9	11,4	69,6
	Média					21,6	8,5	7,8	70,6
d> 2,5	IT C	-25,4+19,1	81,4	0,9	0,09	18,6	10,0	0,0	81,4
	IT V	-25,4+19,1	78,7	0,6	0,09	21,3	6,7	0,0	78,7
	VI V	-19,1+12,7	84,5	0,9	0,09	15,5	10,0	0,0	84,5
	Média					18,5	8,9	0,0	81,5

RI_{100°C} – resíduo insolúvel do ataque por solução de HCl, seco a 100°C.

A – teor de aglomerantes.

H₂O₍₂₎ – teor de água de constituição dos argilominerais.

AR=H₂O₍₂₎/0,09.

CV – teor da fase “cerâmica vermelha”.

RO – teor da fase “rocha”. R=100-A-CV

Os teores de aglomerantes no intervalo “ $d > 2,2$ ” variaram de 15,5 a 23,9%, com média aproximada de 20%, valor próximo ao de um concreto convencional¹⁷. Eles também aumentaram, de forma representativa, no intervalo “ $1,7 < d < 2,2$ ” (26,4-47,6%).

Os teores de argilominerais são superiores a 5,0%, com possibilidade de não serem adequados para o uso como agregados (SMITH; COLLIS, 1993). Como grande parte dos argilominerais é proveniente da fase “cerâmica vermelha”, é possível estabelecer uma correlação linear positiva entre os teores de argilominerais e os teores de cerâmica vermelha, conforme a Figura 5.17.

Figura 5.17 Correlação linear positiva entre o teor de argilominerais e os teores da fase cerâmica vermelha nas frações granulométricas selecionadas nos intervalos de densidade.

O teste de análise de variância no Apêndice D permite concluir que existe diferença estatística significativa entre as médias dos teores de aglomerantes e de argilominerais no intervalo “ $1,7 < d < 2,2$ ”, se comparado à média dos mesmos no intervalo “ $d > 2,2$ ”.

A Figura 5.18 mostra que os teores de aglomerantes e de argilominerais dos produtos selecionados nos intervalos de densidade, para cada tipo de agregado grão de RCD reciclado, diminuem à medida que a mediana do intervalo de

¹⁷ Consumo de cimento = 400 kg/m^3 concreto - Massa específica concreto = 2.200 kg/m^3 .
Teor (%) = $400/2.200 = 18\%$.

densidade aumenta, acompanhados do aumento dos teores de rochas. Em alguns casos, é possível estabelecer correlações lineares e exponenciais significativas.

Figura 5.18 Correlações entre os teores de aglomerantes (a), de argilominerais (b) e de rochas (c) e as medianas do intervalo de densidade nos produtos das separações por densidade de IT C, IT V e VI V.

Como a soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha representam os materiais mais porosos presentes nas frações selecionadas separadas por densidade, é possível estabelecer uma correlação significativa entre a soma desses teores com a massa específica aparente média dessas frações, conforme ilustra a Figura 5.19. A dispersão é atribuída à diferença de porosidade na pasta de cimento ou de cal endurecida.

Figura 5.19 Correlação entre a soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha e os valores de massa específica aparente das frações selecionadas separadas por densidade.

5.7 Conclusões do capítulo

Os produtos no intervalo “ $d < 1,7$ ” representam apenas 1% da massa e concentraram grande parte do material não-mineral presente nos agregados graúdos de RCD reciclados, especialmente para aqueles de origem vermelha (IT V e VI V).

O intervalo de densidade “ $d > 1,7$ ” é composto essencialmente por partículas da fase “cimentícia”, “cerâmica vermelha” e “rochas”. Os agregados no intervalo “ $1,7 < d < 1,9$ ” não são adequados para uso em concretos segundo a norma alemã, porque é alto o teor de contaminantes, tais como cimento amianto e betume (até aproximadamente 10%), incluindo a presença de cerâmica vermelha muito porosa. Há uma tendência de redução nos teores da cerâmica vermelha com o aumento de densidade, compensada pelo aumento nos teores da fase “cimentícia”.

Os agregados no intervalo “ $1,9 < d < 2,2$ ” são adequados para uso em concretos com resistência mecânica de até 20 MPa conforme a recomendação da RILEM. Já os agregados no intervalo “ $d > 2,2$ ” são adequados para uso em concretos de resistência mecânica até 60 MPa, e representam, em média, mais de 40% da massa. Essa distribuição de massa é influenciada pela origem dos agregados. Os teores da fase “rocha” aumentam, de forma significativa, a partir do intervalo “ $d > 2,5$ ”.

Os teores de aglomerantes e de argilominerais são mais representativos no intervalo “ $d < 2,2$ ”, confirmados pelas fases cristalinas na análise mineralógica por DRX. Grande parte dos argilominerais é originada da cerâmica vermelha, origem comprovada pela correlação linear positiva entre eles. No entanto, uma parcela é atribuída à presença das rochas, num total de até 10% nesse estudo. Os teores de perda ao fogo, que representam indiretamente os argilominerais, aumentam à medida que a densidade do intervalo diminui. No intervalo “ $d > 2,2$ ”, os teores de rochas são mais representativos, o que se confirma pelo aumento da intensidade dos picos relacionados aos feldspatos potássicos (ortoclásio e microclínio) e albita, na análise por DRX.

A separação por líquidos densos é uma técnica eficiente para separar os agregados graúdos de RCD reciclados em subgrupos com valores distintos de massa específica aparente, inclusive as fases identificadas de forma visual (partículas cimentícias, de cerâmica vermelha e de rochas) e grupos de materiais (aglomerantes e argilominerais), apesar do erro ocasionado pela absorção dos líquidos densos pelas partículas porosas, que é sistemático. Assim, operações industriais de separação por densidade do Tratamento de Minérios podem ser utilizadas com o objetivo de melhorar a qualidade do agregado reciclado.

Na usina de Itaquera, a distribuição de massa dos agregados graúdos de RCD reciclados aumentou nos produtos mais densos à medida que a partícula diminuiu de tamanho. Nesse caso, a cominuição converteu a porosidade das partículas em superfície específica, aumentando sua densidade. Essa tendência não foi observada nos agregados da usina da Vinhedo.

A classificação do RCD mineral realizada nas usinas de reciclagem nacionais (agregados cinza e vermelho) não é eficiente para melhorar a distribuição de massa nos intervalos de densidade dos agregados graúdos de RCD reciclados. Além disso, os teores médios de cerâmica vermelha nos agregados graúdos de RCD reciclados, calculados pela média ponderada, não ultrapassaram 24,2%, não justificando esse tipo de classificação.

Existe uma grande diferença na distribuição de massa por densidade dos agregados graúdos de RCD reciclados em função da origem (de Itaquera ou de Vinhedo).

6 INFLUÊNCIA DA POROSIDADE DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RCD RECICLADOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

A distribuição e tipos de poros nos concretos influenciam a sua resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 1994; YAMAN *et al.*, 2002; KUMAR; BHATTACHARJEE, 2003). Na utilização dos agregados naturais, a pasta de cimento endurecida é mais porosa (NEVILLE, 1997; POWERS, 1960) e essa porosidade influencia nas propriedades mecânicas do concreto (YAMAN *et al.*, 2002). A Lei de Abrams correlaciona a variação da relação água/cimento (a/c) com a variação da resistência mecânica do concreto, por causa da porosidade da pasta originada do excesso de água presente na mistura (POWERS, 1960; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os agregados graúdos de RCD reciclados são mais porosos que os naturais (LIMBACHIYA *et al.*, 2000) e também influenciam nas propriedades mecânicas do concreto, especialmente em determinadas faixas de porosidade, conforme GÓMEZ; SOBERÓN (2002), determinando inclusive sua durabilidade (WIRQUIN *et al.*, 2000; BUYLE-BODIN; HADJIEVA-ZAHARIEVA, 2002) e seu comportamento reológico, pela falta de água na pasta absorvida pelo agregado, quando não pré-saturado (BARRA, 1996; LARRARD, 1999; LEITE, 2001; POON *et al.*, 2004; SÁNCHEZ; ALAEJOS, 2004).

A porosidade dos agregados de RCD reciclados influencia a massa específica aparente e pode ser determinada pela absorção de água, que é a massa de água que acessa os poros permeáveis num período de 24 horas (ASTM, 1993). A separação por líquidos densos é uma técnica eficiente para separar os agregados graúdos de RCD reciclados em subgrupos com valores de massa específica aparente distintos, o que resulta uma classificação de agregados de acordo com a porosidade, e também

um relativo controle das fases aí presentes, pois a pasta de cimento endurecida e a fase “cerâmica vermelha” são os grupos mais porosos presentes nesses agregados.

O objetivo neste capítulo é analisar a influência da porosidade dos agregados graúdos de RCD reciclados, por meio da massa específica aparente, no comportamento mecânico dos concretos, bem como dos teores dos aglomerantes e da cerâmica vermelha.

6.1 Programa experimental, materiais e métodos

O programa experimental deste capítulo foi desenvolvido conjuntamente com CARRIJO (2005). Dois diferentes tipos de agregados de RCD reciclados (cinza e vermelho) foram coletados na usina de reciclagem de Itaquera-São Paulo, com o objetivo de obter diferentes teores de cerâmica vermelha. Em seguida, esses agregados foram separados, por densidade, em 4 intervalos (g/cm^3): $d < 1,9$; $1,9 < d < 2,2$; $2,2 < d < 2,5$; $d > 2,5$. A composição granulométrica, propriedades físicas (massa específica aparente e absorção de água) e os teores de aglomerantes, de argilominerais e da fase “cerâmica vermelha” foram determinados nos diferentes produtos da separação densitária. Em seguida, os concretos foram produzidos empregando os diferentes produtos, usando-se um método de dosagem que mantém a proporção volumétrica desses agregados na proporção de mistura. Foram determinados a consistência dos concretos bem como a resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água.

6.1.1 Coleta das amostras dos agregados graúdos de RCD reciclados

Amostras de agregados graúdos de RCD reciclados foram coletadas na usina de reciclagem de Itaquera, sendo processada 1 tonelada de RCD do tipo cinza e 1 tonelada do tipo vermelho.

O peneiramento foi realizado em peneira de abertura de malha 19,1 mm, sendo reprocessada a fração retida em britador de mandíbula de laboratório (marca FURLAN, modelo BM 2010, 7,5CV/380 rpm), com abertura de mandíbula em torno de 10 mm, até reduzir todas as frações à dimensão menor que a abertura da malha da peneira 19,1 mm. Em seguida, a fração passante foi peneirada na peneira de abertura

de malha de 9,5 mm. Assim, a granulometria dos agregados graúdos de RCD reciclados ficou definida como Brita 1 da NBR 7211 (ABNT, 1983).

A fração fina aderida nos agregados graúdos de RCD reciclados que corresponde à fração passante em peneira de 75 μm foi eliminada mediante lavagem com água corrente sobre peneira de abertura de malha 9,5 mm, para minimizar essa influência no comportamento do concreto no estado fresco e endurecido.

6.1.2 Separação dos agregados graúdos de RCD reciclados por densidade

Os métodos laboratoriais de separação por líquidos densos não se mostraram adequados para esta etapa, porque (CARRIJO, 2005):

- a) A separação por solução aquosa de cloreto de zinco contamina os agregados com diferentes teores de cloretos solúveis, que podem influenciar no tempo de pega do cimento.
- b) A separação por solução de álcool etílico-bromofórmio é inviável em razão do custo e da necessidade de uso de capelas ventiladas de grande área útil.

A separação foi realizada empregando o equipamento de concentração densitária (ITEP, 1980), denominado *Sink and Float*, de escala piloto, cedido pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/Rio de Janeiro)¹⁸, conforme a Figura 6.1. A polpa do meio denso foi obtida por suspensões de ferro-silício (silício-15% e ferro-85%), com densidade aproximada de 6,9 g/cm³, em meio aquoso, atingindo uma densidade máxima de polpa de 3,4 g/cm³ que atende às restrições impostas no experimento.

¹⁸ O equipamento foi recomendado pelo Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Figura 6.1 Equipamento “Sink and Float”, marca Denver (a) e o ferro silício em pó (b).

A Figura 6.2 mostra o desenho esquemático do funcionamento do equipamento “Sink and Float”.

Figura 6.2 Desenho esquemático sobre o funcionamento do equipamento “Sink and Float”.

Atingida a densidade de polpa desejada, os agregados graúdos de RCD reciclados eram lançados, vagarosamente, de maneira uniforme, na superfície da polpa livre de partículas, do cone superior do equipamento. O cesto contido nesse cilindro maior reteve as partículas afundadas enquanto o fluxo da polpa transportava as flutuadas para o cone inferior, sendo retidas pelo cesto do cilindro menor, concluindo a separação. Os cestos eram a seguir retirados dos cones e lavados com água corrente até a superfície das partículas estar completamente limpa da suspensão de ferro-silício.

Inicialmente, a água foi adicionada no equipamento até iniciar a circulação. Em seguida, o ferro silício foi adicionado progressivamente até a polpa adquirir a densidade desejada com variação admissível de $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. A densidade de polpa foi determinada pela razão da massa e do volume em uma proveta graduada de 1000 mL, coletada em intervalos de tempo regulares, num total de 30 segundos. A densidade era monitorada periodicamente a cada três baldes de 8 L de agregados alimentados no equipamento, e o ferro silício que sedimentava era recirculado a partir de uma torneira situada na parte inferior do equipamento.

A Figura 6.3 mostra o fluxograma da separação densitária seqüencial dos diferentes tipos de agregados graúdos de RCD reciclados empregando o equipamento “Sink and Float”. Inicialmente, os agregados foram separados na densidade de $2,2 \text{ g/cm}^3$ definindo dois produtos: $d > 2,2$ e $d < 2,2$. A fração menos densa foi separada na densidade de $1,9 \text{ g/cm}^3$ definindo outros dois produtos: $d < 1,9$ e $1,9 < d < 2,2$. A fração mais densa foi separada na densidade de $2,5 \text{ g/cm}^3$ definindo outros dois produtos: $2,2 < d < 2,5$ e $d > 2,5$. Foram assim obtidos oito tipos de agregados graúdos de RCD reciclados, quatro do tipo cinza (C) e quatro do tipo vermelho (V): C $d < 1,9$; C $1,9 < d < 2,2$; C $2,2 < d < 2,5$; C $d > 2,5$; V $d < 1,9$; V $1,9 < d < 2,2$; V $2,2 < d < 2,5$ e V $d > 2,5$.

Figura 6.3 Fluxograma da separação densitória sequencial dos agregados graúdos de RCD reciclados empregando o equipamento “Sink and Float”.

Os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade foram secos sobre uma lona, em condição ambiente, e homogeneizados em pilhas alongadas conforme procedimento apresentado no item 4.1.1 do capítulo 4. Uma alíquota de aproximadamente 10 kg foi tomada para realizar os ensaios de caracterização dos agregados, conforme a Figura 6.4. O material excedente foi retirado em alíquotas e armazenado no laboratório para a produção dos concretos.

Figura 6.4 Pilha alongada com agregado graúdo de RCD reciclado separado por densidade (a) e retirada de alíquota de 10 kg (b).

6.1.3 Outros materiais para a produção dos concretos

Foi empregado no experimento um cimento composto com até 30% de adição de escória (sigla CP II E 32), marca Votorantim, com resistência mecânica aos 28 dias de 32 MPa, amplamente empregado no mercado nacional. O agregado miúdo empregado foi uma areia de rio natural quartzosa lavada, do tipo grossa, denominada

“A”. Para a produção dos concretos de referência, foi utilizada brita natural, de origem granítica, de dimensão máxima característica de 19,0 mm, denominada “B”.

6.1.4 *Caracterização dos materiais*

A composição granulométrica dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, da brita natural e da areia de rio lavada foi determinada pela NBR NM 248 (NM, 2003b).

A absorção de água da areia de rio quartzosa lavada foi desprezada. Assim, assume-se que os resultados da massa específica aparente e real são iguais. A massa específica real da areia de rio lavada foi determinada pelo volume, empregando picnômetro de Hélio, marca Quantachrome, modelo MUP-SOC. Não foi caracterizada a massa específica aparente da brita, sendo adotado um valor igual a 2,675 kg/dm³. A massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdos de RCD reciclados foram determinadas com alíquotas de aproximadamente 3 kg pela NBR NM 53 (NM, 2003a). Esses procedimentos estão apresentados no item 5.1.4 do capítulo 5. Adicionalmente, a massa de água absorvida dos agregados graúdos de RCD reciclados foi determinada nos intervalos de tempo (em minutos): 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300 e 1440. O objetivo foi definir o tempo necessário para atingir 70% do valor da absorção de água em um período de 24 horas.

A Figura 6.5 mostra o fluxograma operacional para a determinação dos teores de aglomerantes, de argilominerais, de cerâmica vermelha e de rocha nos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade.

Figura 6.5 Fluxograma operacional para a determinação dos teores de aglomerantes, de argilominerais, de cerâmica vermelha e de rocha nos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”.

Alíquotas de até 100g foram tomadas dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade e pulverizadas, conforme o procedimento de preparação de amostras do item 4.1.3. A fração solúvel no ataque ácido com solução de HCl 33% foi determinada pela média de duas determinações em alíquotas de 2,5g secas a 100°C, sendo considerada igual ao teor de aglomerantes, conforme os resultados apresentados nos capítulos 4 e 5. Em seguida, a água de constituição dos argilominerais foi determinada pela perda de massa entre 150 e 1.000°C na análise termogravimétrica (uma única determinação em alíquotas de 1.000 mg) dos resíduos insolúveis do ataque com HCl. Os teores dos argilominerais foram estimados adotando-se uma constante estequiométrica média de 0,09, conforme apresentado no capítulo 4.

Os teores de cerâmica vermelha foram determinados pela catação nas alíquotas remanescentes (aproximadamente 3,4 kg), conforme o procedimento apresentado no item 5.1.3 do capítulo 5. O teor de rochas naturais foi estimado pelo complemento da soma dos teores de aglomerantes e da cerâmica vermelha.

6.1.5 *Dosagem dos concretos*

O método de dosagem adotado fixou o volume de agregados graúdos em 40% e a água em 20%, uma vez que a definição das proporções de mistura, em massa, segundo o método IPT-EP/USP (HELENE; TERZIAN, 1992) conduziria à variação de volume desses agregados, resultantes da variação da massa específica aparente (LEITE, 2001; LARRARD, 1999).

A variação na porosidade da pasta foi obtida através da adoção de três diferentes consumos de cimento (kg/m^3): 300, 400 e 500, que resultou nas respectivas relações água/cimento de 0,67, 0,5 e 0,4. Para um mesmo consumo de cimento ou relação a/c, o único fator que afeta a porosidade (e a resistência) dos concretos é a porosidade dos agregados. Nesse caso, admitiu-se uma variação de 9 a 11% na relação entre a água e materiais secos e a uma variação de 0,51 a 0,61 na proporção entre areia e os agregados graúdos. Elas são consideradas toleráveis para os concretos plásticos (HELENE; TERZIAN, 1992).

Os agregados graúdos foram secos em estufa a 110 °C por 24 horas e resfriados por aproximadamente duas horas até atingirem o equilíbrio térmico com a condição ambiente. Antes da mistura, eles foram imersos durante 10 minutos numa quantidade de água que equivale a 70% do valor de absorção de água. A partir desse valor de pré-saturação, a influência da absorção de água dos agregados nas propriedades do concreto, no estado fresco, é pequena (LEITE, 2001; POON *et al.*, 2004).

Em seguida, o misturador era acionado com metade da água de amassamento seguido do cimento, da areia, do restante de água e do aditivo até atingir um ponto semelhante à consistência plástica.

A consistência de todos os concretos foi mantida acima do limite plástico (abatimento pelo tronco de cone maior que 40 mm) empregando-se aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, Glenium 51, da “Master Building Technology” do Brasil, sendo o seu teor associado somente à fluidez da pasta de cimento.

As proporções de mistura, em massa, dos concretos foram calculadas, conforme a Tabela 6.1, a partir dos valores de massa específica aparente dos agregados, e dos valores de massa específica real da areia quartzosa de rio lavada e do cimento.

Cinco corpos-de-prova (diâmetro de 10cm e altura de 20 cm) por proporção de mistura foram moldados de acordo com a NBR 5738, num total de 125, sendo destinados a três ensaios de resistência à compressão, três de módulo de elasticidade e dois de absorção de água. Eles permaneceram cobertos com plástico durante 24 horas para evitar a perda de água e, em seguida, foram desmoldados e curados por 28 dias, em câmara úmida, com temperatura constante de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, e umidade superior a 95%.

Tabela 6.1 Proporção de mistura dos concretos com os agregados graúdos separados densitariamente pelo “Sink and Float” para diferentes consumo de cimento.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
		C	V	C	V	C	V	C	V
Consumo cimento=300 kg/m ³	Agregados graúdos	B	d<1,9	d<1,9	1,9<d<2,2	1,9<d<2,2	2,2<d<2,5	2,2<d<2,5	d>2,5
	Massa Água ¹ (kg/m ³)	200	200	200	200	200	200	200	200
	Massa Cimento ² (kg/m ³)	300	300	300	300	300	300	300	300
	Massa Areia ³ (kg/m ³)	795	795	795	795	795	795	795	795
	Massa Agr. Graúdo ⁴ (kg/m ³)	1070	712	696	844	808	1012	996	1048
	Cimento (kg)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Areia (kg)	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
	Agregado Graúdo (kg)	3,57	2,37	2,32	2,81	2,69	3,37	3,32	3,49
	Água/cimento (kg)	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
	Teor de argamassa (%)	0,51	0,61	0,61	0,56	0,58	0,52	0,52	0,51
	Água/Mat. secos (%)	9,24	11,07	11,17	10,31	10,51	9,49	9,56	9,33
		T10	T11#	T12#	T13	T14	T15	T16	T17
Consumo cimento=400 kg/m ³									
	Tipos dos agregados graúdos	B	C	V	C	V	C	V	C
	Massa Água ¹ (kg/m ³)	200	200	200	200	200	200	200	200
	Massa Cimento ² (kg/m ³)	1070	712	696	844	808	1012	996	1048
	Massa Areia ³ (kg/m ³)	400	400	400	400	400	400	400	400
	Massa Agr. Graúdo ⁴ (kg/m ³)	707	707	707	707	707	707	707	707
	Cimento (kg)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Areia (kg)	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77
	Agr. Graúdo (kg)	2,68	1,78	1,74	2,11	2,02	2,53	2,49	2,60
	Água/cimento (kg)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	Teor de argamassa (%)	0,51	0,61	0,61	0,57	0,58	0,52	0,53	0,52
	Água/Mat. secos (%)	9,19	11,00	11,09	10,25	10,45	9,44	9,51	9,32
		T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26
Consumo cimento=500 kg/m ³									
	Tipos dos agregados graúdos	B	C	V	C	V	C	V	C
	Massa Água ¹ (kg/m ³)	200	200	200	200	200	200	200	200
	Massa Cimento ² (kg/m ³)	1070	712	696	844	808	1012	996	1048
	Massa Areia ³ (kg/m ³)	500	500	500	500	500	500	500	500
	Massa Agr. Graúdo ⁴ (kg/m ³)	618	618	618	618	618	618	618	618
	Cimento (kg)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Areia (kg)	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
	Agregado Graúdo (kg)	2,14	1,42	1,39	1,69	1,62	2,02	1,99	2,08
	Água/cimento (kg)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	Teor de argamassa (%)	0,51	0,61	0,62	0,57	0,58	0,52	0,53	0,52
	Água/Mat. secos (%)	9,14	10,93	11,02	10,19	10,38	9,39	9,46	9,27
		T27	T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34

¹ Massa específica da água de 1,0 kg/L. ² Massa específica real do cimento de 3,0 kg/L.

³ Massa específica real da areia de 2,65 kg/L. ⁴ Massa específica aparente dos tipos de agregados graúdos de RCD reciclados de 2,67; 1,78; 1,74; 2,11; 2,02; 2,53; 2,49; 2,60 e 2,62 kg/L respectivamente. # - não realizado pela indisponibilidade de agregados.

6.1.6 Propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido

As consistências dos concretos foram determinadas pelo abatimento no tronco de cone conforme a NBR NM 67 (NM, 1998). As massas específicas dos concretos no estado fresco, bem como os teores de ar aprisionado foram determinados conforme a NBR 9833 (método gravimétrico) (ABNT, 1997), mas apenas os dados de 14 dos 24 proporções de mistura produzidas se revelaram consistentes em função de erro na determinação de massa na balança empregada.

Os corpos-de-prova foram retificados no lado superior e capeados com mistura composta de enxofre e pozolana em ambos os lados sendo um deles rompido à compressão, com taxa de carregamento de 0,3 MPa/s, em prensa universal Shimadzu de capacidade de 200 kgf. Em seguida, três corpos-de-prova foram encaminhados à determinação do módulo de elasticidade tangente inicial (ABNT, 1984) por meio da aplicação de novos ciclos de carregamento e descarregamento com cargas equivalentes a 30% da resistência à compressão, com taxa de carregamento de 0,5 MPa/s, e medidas das deformações em quatro dos nove ciclos totais de carregamento, mediante um extensômetro mecânico com relógio comparador de precisão de 0,01 mm, sendo dois destes posteriormente rompidos à compressão. Os dois corpos-de-prova remanescentes foram imersos em água na temperatura ambiente durante 3 dias e, em seguida, submetidos à ebulição por 14 horas para a determinação da absorção de água por imersão dos concretos.

6.2 Caracterização dos materiais

6.2.1 Distribuição granulométrica dos agregados

A Figura 6.6 mostra as distribuições retidas acumuladas dos tipos de agregado graúdo de RCD reciclado e da brita granítica. Todas as distribuições estão contidas dentro dos limites estabelecidos para a Brita 1 da ABNT. Elas são distintas se comparada à distribuição da brita granítica. A quantidade de material retido na peneira de abertura de 12,7 mm aumenta para os agregados mais densos.

Figura 6.6 Distribuições retidas acumuladas dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”, e da brita com os limites estabelecidos para a Brita 1 da ABNT.

A Figura 6.7 mostra a distribuição retida acumulada da areia de rio lavada. Esta graduação está situada na zona 4 (areia grossa), estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 1983). O módulo de finura foi de 3,33.

Figura 6.7 Distribuição retida acumulada da areia de rio lavada com os limites da zona 4 estabelecidos pela NBR 7211.

6.2.2 Caracterização dos agregados graúdos de RCD reciclados

A Tabela 6.2 mostra os resultados de massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”.

Tabela 6.2 Resultados de massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”.

Agregados separados por densidade	Massa esp. aparente (kg/dm ³)	Absorção (%)	Volume de Poros dm ³ /dm ³ (%)
C d<1,9	1,78	14,6	39,0
V d<1,9	1,74	15,3	40,9
C 1,9<d<2,2	2,11	8,0	21,4
V 1,9<d<2,2	2,02	9,0	24,0
C 2,2<d<2,5	2,53	2,0	5,3
V 2,2<d<2,5	2,49	2,8	7,5
C d>2,5	2,60	1,5	4,0
V d>2,5	2,62	1,4	3,7

$$VolumePoros(\%) = Absorção \times 2,67$$

2,67 é a média da massa específica real dos agregados separados por densidade (ver cap. 5).

Os agregados obtidos pelo “Sink and Float” no intervalo “d> 2,2” apresentam valores de absorção de água inferiores a 3%, bem inferior à média obtida na separação por líquidos densos (6,3%) que se aproximou do limite estabelecido (7%) da proposta de norma espanhola para o emprego de agregados graúdos de concreto reciclados em concretos estruturais (ALAEJOS *et al.*, 2004), e valor médio de absorção de água em concretos brasileiros (ANGULO; JOHN, 2001).

A Figura 6.8 mostra a correlação linear entre as medianas do intervalo de densidade e os valores de massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados de Itaquera separados por densidade pelo “Sink and Float”, e compara essa correlação com a correlação média obtida para as outras amostras de agregados que foram separadas por densidade pelos líquidos densos (ver item 5.4).

Para um mesmo valor de mediana de densidade de separação, os agregados separados pelo “Sink and Float” apresentam valores superiores de massa específica aparente se comparado aos valores médios dos agregados separados pelos líquidos densos. A variação da massa específica aparente é atribuída à: a) diferença entre as amostras caracterizadas, e b) diferença no método da separação densitária, seja pelo tipo de líquido utilizado (líquidos densos e suspensão de Fe-Si e água) ou pela dinâmica de separação (estática ou dinâmica).

Figura 6.8 Correlações lineares entre as medianas do intervalo de densidade e os valores de massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente por dois diferentes métodos.

A Figura 6.9 mostra os valores de absorção de água ao longo do tempo para agregados graúdos de RCD reciclados de Itaquera separados por densidade pelo “Sink and Float”. A taxa de absorção é alta nos primeiros dez minutos. Após este período, essa taxa é lenta e tende a se estabilizar. Conclusões semelhantes foram obtidas por LEITE (2001). Nos primeiros 10 minutos, os agregados graúdos de RCD reciclados absorvem de 70 a 86% da absorção do período de 24 horas. A norma DIN 4226 (DIN, 2002) também usa os valores de absorção de água no período de 10 minutos como estimativa da absorção de água no período de 24 horas (RUHL, 1997). As curvas de absorção de água no tempo dos agregados cinzas e vermelhos de Itaquera são semelhantes, quando contidas em um mesmo intervalo de densidade.

Figura 6.9 Absorção de água em função do tempo para os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade pelo “Sink and Float”.

A Tabela 6.3 mostra os teores de aglomerantes, dos argilominerais, da fase “cerâmica vermelha” e das rochas nos agregados graúdos de RCD reciclados de Itaquera separados por densidade pelo “Sink and Float”, que serão correlacionados com as propriedades mecânicas do concreto.

Tabela 6.3 Teores dos aglomerantes, dos argilominerais, da “cerâmica vermelha” e da “rocha” nos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade pelo “Sink and Float”.

Agregados separados por densidade	RI _{100°C} (%)	A (%)	H ₂ O ₍₂₎ (%)	AR (%)	CV (%)	R (%)
C d<1,9	75,8	24,2	1,7	18,9	15,4	60,4
V d<1,9	76,9	23,1	1,8	20,0	24,6	52,3
C 1,9<d<2,2	71,8	28,2	0,8	8,9	0,3	71,5
V 1,9<d<2,2	73,3	26,7	0,6	6,7	4,6	68,7
C 2,2<d<2,5	81,1	18,9	0,5	5,6	0,0	81,1
V 2,2<d<2,5	81,7	18,3	0,6	6,7	0,3	81,4
C d>2,5	85,8	14,2	0,6	6,7	0,1	85,7
V d>2,5	84,2	15,8	0,6	6,7	0,0	84,2

RI_{100°C} – resíduo insolúvel do ataque por solução de HCl, seco a 100°C.

A – teor de aglomerantes.

H₂O₍₂₎ – teor de água de constituição dos argilominerais.

AR – teor de argilominerais. AR (%) = $H_2O_{(2)} / 0,09$. 0,09 é a constante estequiométrica adotada no item 4.1.9, do capítulo 4.

CV – teor da fase “cerâmica vermelha”.

R – teor da fase “rocha”. R = 100 - A - CV

A Figura 6.10 compara os teores de aglomerantes, de argilominerais, de cerâmica vermelha e de rochas nas duas amostras de agregados graúdos de RCD

reciclados em função da mediana do intervalo de densidade por dois métodos de separação distintos. A principal diferença está no intervalo “ $1,7 < d < 1,9$ ”, em que os teores médios de aglomerantes e de cerâmica vermelha diminuíram 30% aproximadamente, acompanhado do aumento, na mesma ordem de grandeza, das rochas. Os teores de cerâmica vermelha nas amostras de Itaquera separadas pelo “Sink and Float” não ultrapassaram 25% da massa. Essa diferença diminui com o aumento da mediana do intervalo de densidade.

Figura 6.10 Comparação dos teores de aglomerantes (a), de cerâmica vermelha (b), de rocha (c) e de argilominerais (d) nas duas amostras de agregados graúdos de RCD reciclados em função da mediana do intervalo de densidade por dois métodos de separação distintos.

6.3 Propriedades dos concretos no estado fresco

A Tabela 6.4 apresenta os abatimentos, consumos de aditivo, teores de ar aprisionado e massas específicas dos concretos, no estado fresco, para os agregados

grãos de RCD reciclados separados por densidade, e a brita natural. As medidas de abatimento variaram de 50 a 150 mm, apesar do emprego do aditivo e da compensação da água de absorção dos agregados, que tinham por objetivo manter esse abatimento constante. Apesar disso, todos os concretos foram trabalháveis garantindo-se o adensamento eficiente em todos os corpos-de-prova.

Tabela 6.4 Abatimentos, consumos de aditivo, teores de ar aprisionado e massas específicas dos concretos, no estado fresco, para os agregados grãos de RCD reciclados separados por densidade, e a brita natural

Prop. de mistura	Agregados sep. por densidade	Relação a/c	Consumo de aditivo (%)	Abatimento (mm)	Ar aprisionado (%)	Massa esp. concreto fresco (kg/dm ³)
T2	C d<1,9	0,67	*	*	*	*
T3	V d<1,9	0,67	0,50	55,0	2,63	1,96
T4	C 1,9<d<2,2	0,67	0,18	50,0	3,16	2,11
T5	V 1,9<d<2,2	0,67	0,18	60,0	2,96	2,07
T6	C 2,2<d<2,5	0,67	0,06	75,0	1,81	2,29
T7	V 2,2<d<2,5	0,67	0,09	70,0	2,01	2,27
T8	C d>2,5	0,67	0,00	95,0	3,86	2,32
T9	V d>2,5	0,67	0,00	130,0	2,88	2,31
T11	C d<1,9	0,50	*	*	*	*
T12	V d<1,9	0,50	0,40	55,0	**	**
T13	C 1,9<d<2,2	0,50	0,07	65,0	**	**
T14	V 1,9<d<2,2	0,50	0,07	60,0	**	**
T15	C 2,2<d<2,5	0,50	0,10	125,0	**	**
T16	V 2,2<d<2,5	0,50	0,05	95,0	1,62	2,28
T17	C d>2,5	0,50	0,08	95,0	3,90	2,36
T18	V d>2,5	0,50	0,00	105,0	1,63	2,37
T20	C d<1,9	0,67	0,40	150,0	**	**
T21	V d<1,9	0,67	0,39	60,0	**	**
T22	C 1,9<d<2,2	0,67	0,09	120,0	**	**
T23	V 1,9<d<2,2	0,67	0,10	70,0	**	**
T24	C 2,2<d<2,5	0,67	0,09	95,0	1,48	2,31
T25	V 2,2<d<2,5	0,67	0,10	75,0	1,24	2,30
T26	C d>2,5	0,67	0,07	90,0	2,22	2,36
T27	V d>2,5	0,67	0,06	105,0	2,11	2,37

* Proporção de mistura de concreto não produzida por falta de material.

** Medidas inconsistentes.

A Figura 6.11a mostra que as medidas de abatimento no tronco de cone foram influenciadas pela massa específica do concreto no estado fresco, assim como pela massa específica aparente dos agregados grãos de RCD reciclados separados por densidade (Figura 6.11b), uma vez que a primeira depende da segunda (Figura 6.12). Como a massa do concreto é a única força atuante na deformação do concreto durante o ensaio de abatimento, são esperados abatimentos crescentes na razão direta da massa específica para concretos de uma mesma trabalhabilidade. A variabilidade

dos resultados aumentou para os agregados mais densos e foi pouco influenciada pela relação a/c ou consumo de cimento.

Figura 6.11 Medidas de abatimento dos concretos em função da massa específica do concreto fresco (a) e da massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade (b).

Figura 6.12 Massa específica do concreto fresco em função da massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade.

Nesse caso, o consumo médio de aditivo também foi influenciado pela massa específica aparente desses agregados, conforme a Figura 6.13, e ele decresceu com o aumento da massa específica aparente, não justificando o aumento de variabilidade na medida do abatimento para os agregados mais densos.

Figura 6.13 Consumo médio de aditivo nos concretos em função da massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”.

Os teores de ar aprisionado nos concretos foram abaixo de 4%, apresentando tendência de aumento para os agregados mais densos e para as relações a/c maiores, conforme a Figura 6.14.

Figura 6.14 Teor de ar aprisionado nos concretos em função do intervalo de densidade dos agregados e da relação a/c.

O abatimento não correspondeu à trabalhabilidade do concreto, especialmente para aqueles produzidos com os agregados menos densos. Isso também foi observado por Leite (2001). É necessário considerar outros parâmetros não estáticos de medida reológica do concreto, que são discutidos em Neville (1997) e em Larrard (1999).

6.4 Propriedades do concreto no estado endurecido

6.4.1 Porosidade e absorção de água

A Tabela 6.5 mostra a porosidade média e a massa específica média da amostra seca dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, e brita natural.

Tabela 6.5 Porosidade média e massa específica média da amostra seca dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, e a brita natural.

Prop. de mistura	Agregados sep. por densidade	Relação a/c	Porosidade média (%)	Massa específica da amostra seca (kg/dm ³)
T1	B	0,67	15,64	2,17
T2	C d<1,9	0,67	*	*
T3	V d<1,9	0,67	24,69	1,71
T4	C 1,9<d<2,2	0,67	20,71	1,89
T5	V 1,9<d<2,2	0,67	21,07	1,83
T6	C 2,2<d<2,5	0,67	16,97	2,11
T7	V 2,2<d<2,5	0,67	17,74	2,09
T8	C d>2,5	0,67	16,57	2,19
T9	V d>2,5	0,67	15,86	2,18
T10	B	0,50	14,52	2,19
T11	C d<1,9	0,50	*	*
T12	V d<1,9	0,50	24,47	1,76
T13	C 1,9<d<2,2	0,50	20,37	1,98
T14	V 1,9<d<2,2	0,50	21,48	1,91
T15	C 2,2<d<2,5	0,50	16,58	2,12
T16	V 2,2<d<2,5	0,50	16,70	2,12
T17	C d>2,5	0,50	15,33	2,18
T18	V d>2,5	0,50	15,93	2,21
T19	B	0,67	14,56	2,22
T20	C d<1,9	0,67	23,11	1,8
T21	V d<1,9	0,67	23,27	1,78
T22	C 1,9<d<2,2	0,67	20,74	1,98
T23	V 1,9<d<2,2	0,67	21,22	1,97
T24	C 2,2<d<2,5	0,67	15,13	2,18
T25	V 2,2<d<2,5	0,67	16,97	2,14
T26	C d>2,5	0,67	14,41	2,21
T27	V d>2,5	0,67	14,93	2,21

* Proporção de mistura de concreto não produzida por falta de material.

O apêndice E apresenta o cálculo da porosidade teórica do concreto empregando-se uma simplificação do modelo de Powers (POWERS, 1960), na qual a

retração química, retração por secagem e o ar aprisionado dos concretos¹⁹ foram desprezados. A Figura 6.15 mostra que existe um erro sistemático entre o modelo teórico e o experimental resultante dessa simplificação, além de eventuais poros não saturados pelo método experimental.

Figura 6.15 Correlação entre a porosidade média do experimento e teórica nos concretos produzidos com agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade e diferentes consumo de cimento ou relações a/c.

A Figura 6.16 mostra a correlação linear entre a porosidade dos agregados graúdos separados por densidade e a dos concretos. A porosidade da pasta de cimento variou de 14,5 a 15,7%. Já a porosidade desses agregados variou aproximadamente 9%. A influência da porosidade da pasta de cimento na porosidade do concreto, portanto, é pequena se comparada à desses agregados.

A absorção de água dos concretos, por ser uma medida direta dos poros acessíveis à água, está correlacionada com a massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados, por ser uma variável dependente do volume de vazios, conforme a Figura 6.17a, para as diferentes relações a/c ou consumos de cimento, assim como a absorção de água dos concretos está correlacionada com a soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha, conforme a Figura 6.17b, por representarem os grupos de materiais sistematicamente mais porosos presentes

¹⁹ Indisponibilidade de dados para todos os traços de concretos.

nesses agregados. Para uma mesma relação a/c, consumo de cimento ou porosidade de pasta de cimento, o volume de poros diminui com o aumento da massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados, acompanhados da redução na soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha.

Figura 6.16 Correlação linear positiva entre a porosidade dos agregados graúdos separados por densidade e a dos concretos.

Figura 6.17 Absorção de água dos concretos em função dos valores de massa específica aparente (a) e da soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha (b) dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, para diferentes relações a/c ou consumos de cimento.

Os resultados de absorção de água dos concretos dos agregados separados por densidade e por natureza (cinza e vermelha) seguem uma distribuição normal e apresentam diferenças estatísticas significativas atribuídas somente ao intervalo de

densidade do agregado pelas análises de variância e comparações múltiplas de médias, conforme a análise estatística do Apêndice D.

A Figura 6.18a mostra as correlações lineares entre os valores de absorção de água dos concretos em função da relação a/c para os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade. Independente da relação a/c, a influência da massa específica aparente do agregado na absorção do concreto é significativa, variando de 6,5 a 14,2%, conforme a Figura 6.18b. O menor valor de absorção representou 50% do maior.

Figura 6.18 Absorção média dos concretos em função da relação a/c (a) e em função dos agregados graúdos separados por densidade, e natural (b).

HELENE (1993) propôs uma classificação dos concretos convencionais baseada em critérios gerais de durabilidade, empregando a propriedade absorção de água. Nessa classificação, os concretos são divididos em três classes: a) concretos duráveis (absorção inferior a 4,2%), b) concretos normais (absorção entre 4,2 e 6,3%) e c) concretos deficientes (absorção superior a 6,3%). Esta é, sem dúvida, a propriedade do concreto, no estado endurecido, mais afetada pelo uso dos agregados graúdos de RCD reciclados (BUYLE-BODIN; HADJIEVA-ZAHARIEVA, 2002). Os concretos obtidos com os agregados no intervalo “d> 2,2” e o agregado natural possuem absorção de água inferior a 8%, sendo classificado como normal sob aspecto de durabilidade segundo a proposta por HELENE (1993).

6.4.2 Resistência à compressão

A Figura 6.19 mostra que não é possível estabelecer uma correlação direta entre a resistência média à compressão e a porosidade dos concretos produzidos com diferentes agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade e diferentes relações a/c. MEHTA; MONTEIRO (1994) afirmam que essa regra dos sólidos homogêneos simples continua válida para pastas e argamassas de cimento. No concreto, essa regra é mais complexa e depende das fases que determinam a ruptura (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; CHI *et al.*, 2003; KUMAR; BHATTACHARJEE, 2003).

Figura 6.19 Resistência média à compressão e a porosidade dos concretos com diferentes agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade e relações a/c.

A resistência média à compressão dos concretos foi normalizada, em porcentagem, para as diferentes relações a/c ou consumos de cimento. Assim, a Figura 6.20a apresenta a influência da porosidade dos agregados graúdos de RCD reciclados nessa resistência, podendo reduzir até 40% desse valor em relação aos agregados naturais. Da mesma forma, essa resistência foi normalizada, em porcentagem, para os diferentes agregados graúdos de RCD reciclados, conforme a Figura 6.20b, analisando-se a influência da porosidade da pasta que pode reduzir até 60% desse valor, apesar da pequena contribuição na porosidade total do concreto.

Esses valores de redução foram obtidos por diversos autores como os sumarizados em HANSEN (1992) e VÁZQUEZ et al. (2001).

Figura 6.20 Correlações lineares entre os resultados de resistência média normalizada à compressão e a porosidade: a) do agregado no concreto, e b) teórica da pasta de cimento.

A resistência à compressão dos concretos apresenta correlação exponencial, conforme a Figura 6.21a, com a relação a/c, que representa indiretamente a porosidade da pasta, e com a massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, que representam indiretamente a porosidade desses agregados.

Figura 6.21 Resistência à compressão dos concretos em função dos valores de massa específica aparente (a) e da soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha (b) dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, para as diferentes relações a/c ou consumos de cimento.

Como a massa específica aparente desses agregados está correlacionada com a soma dos teores dos aglomerantes e de cerâmica vermelha, é possível estabelecer também uma correlação exponencial entre a resistência média à compressão e essa soma, conforme a Figura 6.21b.

Para uma mesma relação a/c ou consumo de cimento, os resultados de resistência à compressão dos concretos dos agregados separados por densidade e por natureza (cinza e vermelho) seguem uma distribuição normal, conforme a análise estatística do Apêndice D. Existe diferença estatística significativa entre as médias desses resultados, conforme os dados apresentados na análise de variância. Na comparação múltipla de médias, é possível concluir que grande parte da diferença estatística dessas médias pode ser atribuída ao intervalo de densidade do agregado, não dependendo, na maioria dos casos, da natureza.

A Figura 6.22a mostra que a Lei de Abrams, que correlaciona a resistência mecânica dos concretos com a relação a/c através de uma função exponencial $f(x)=k.e^{-x}$, só é válida, se mantida a porosidade (ou massa específica aparente) do agregado (CHI *et al.*, 2003). Na relação a/c igual a 0,4, o menor valor de resistência representa 60% do maior valor. As diferenças de resistência entre esses agregados são da ordem de 17,56, 11,53 e 7,07 MPa para as relações a/c de 0,4, 0,5 e 0,67 respectivamente, conforme a Figura 6.22b, sendo ocasionadas pelos agregados do intervalo “ $d < 2,2$ ” e pela relação a/c que aumenta essa diferença à medida que essa relação diminui. Para cada relação a/c ou consumo de cimento, a diferença entre as resistências com agregados no intervalo “ $d > 2,2$ ” e natural não foi superior a 17%.

A Figura 6.23 mostra que os agregados graúdos de RCD reciclados porosos, representados pela pasta de cimento carbonatada (cor cinza) e cerâmica vermelha, estão interferindo no plano de ruptura dos concretos, e conseqüentemente, na resistência do concreto.

Figura 6.22 Resistência média à compressão dos concretos em função da relação a/c (a) e em função dos agregados graúdos separados por densidade, e natural (b).

Figura 6.23 Plano de ruptura em corpo-de-prova de concreto produzido com agregado “d<1,9” após aplicação de fenolftaleína. As partículas cinzas representam os agregados compostos por pasta de cimento carbonatada, e as partículas vermelhas, a fase “cerâmica vermelha”.

A Figura 6.24a mostra as correlações entre a resistência média à compressão dos concretos e o consumo de cimento para esses agregados. No entanto, para um mesmo valor de resistência à compressão, os consumos de cimento variaram significativamente para os diferentes agregados. Essas variações aumentam com o incremento na resistência à compressão. As diferenças não são expressivas para os agregados no intervalo “d> 2,2”, conforme a Figura 6.24b, semelhantemente ao agregado natural. As diferenças de consumo nesses agregados são da ordem de 33, 59, 297 e 947 kg/m³ para valores respectivos de resistência à compressão de 10, 20, 40 e 60 MPa, sendo atribuídas aos agregados menos densos (d< 2,2). Até a

resistência de 20 MPa, o aumento do consumo é aproximadamente de 20%. Entre 20 e 60 MPa, esse aumento pode variar de 76% a 150%, não sendo adequado o uso desses agregados menos densos em concretos estruturais convencionais.

Figura 6.24 Resistência média à compressão dos concretos em função do consumo de cimento para os agregados graúdos separados por densidade, e natural (a) e variação do consumo de cimento nos concretos produzidos com esses agregados para diferentes valores de resistência à compressão (b).

6.4.3 Módulo de elasticidade

Assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade médio normalizado dos concretos está correlacionado com a porosidade do agregado conforme a Figura 6.25, assim como a porosidade teórica da pasta de cimento.

A influência da porosidade dos agregados é maior que a da pasta, reduzindo até 47 % do valor do módulo.

Figura 6.25 Correlações lineares entre os resultados de módulo de elasticidade normalizado e a porosidade: a) do agregado no concreto, e b) teórica da pasta de cimento.

A Figura 6.26 mostra que existem correlações exponenciais entre os resultados de módulo de elasticidade dos concretos com a massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados, e com a relação a/c ou consumo de cimento, assim como em função da soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha desses agregados.

Figura 6.26 Módulo de elasticidade dos concretos em função dos valores de massa específica aparente (a) e da soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, para as diferentes relações a/c ou consumos de cimento.

Para uma mesma relação a/c ou consumo de cimento, os resultados de módulo de elasticidade dos concretos dos agregados separados por densidade e por natureza (cinza e vermelho) seguem uma distribuição normal, conforme a análise estatística do Apêndice D. Existe diferença estatística significativa entre as médias desses resultados, conforme os dados apresentados na análise de variância. Na comparação múltipla de médias, é também possível concluir que grande parte da diferença estatística dessas médias pode ser atribuída ao intervalo de densidade do agregado, não dependendo, na maioria dos casos, da natureza.

A Figura 6.27a mostra as correlações exponenciais entre os valores de módulo de elasticidade dos concretos em função da relação a/c para os agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade. Esses valores obtidos com agregados no intervalo “d > 2,2” foram superiores aos dos agregados naturais para relações a/c inferiores a 0,5 ou consumo de cimento superior a 400 kg/m³. As diferenças de módulos entre esses agregados são entre 14 e 16 GPa para as três relações a/c, sendo influenciadas principalmente pelos agregados, especialmente no intervalo “d < 2,2”. A diferença entre os módulos com agregados no intervalo “d > 2,2” e natural não foi superior a 27%.

Figura 6.27 Módulo de elasticidade médio dos concretos em função da relação a/c (a) e em função dos agregados graúdos separados por densidade, e natural (b).

A Figura 6.28a mostra as correlações entre o módulo de elasticidade médio dos concretos e o consumo de cimento para esses agregados. Para se atingir um

mesmo valor de módulo, os consumos de cimento variaram significativamente para os diferentes agregados. Para se atingir um valor de módulo igual a 25 GPa, o consumo de cimento com agregados menos densos ($d < 2,2$) é acima de 500 kg/m³, conforme a Figura 6.28b, não sendo viável para uso em concretos estruturais convencionais. Mesmo para se atingir um valor de módulo igual a 15 GPa, o consumo de cimento empregando esses agregados, pode variar 100%, não sendo, portanto, interessante essa compensação na propriedade.

Figura 6.28 Módulo de elasticidade médio dos concretos em função do consumo de cimento para os agregados graúdos separados por densidade, e natural (a) e variação do consumo de cimento nos concretos produzidos com esses agregados para diferentes valores de módulo de elasticidade (b).

A Figura 6.29 mostra que a correlação entre os valores de resistência à compressão e o módulo de elasticidade muda em função da massa específica aparente dos agregados e da relação a/c ou consumo de cimento. Para um agregado separado por densidade ou com porosidade constante, a redução da relação a/c ou da porosidade da pasta de cimento aumenta o módulo em até 10 GPa. Já para uma mesma relação a/c ou porosidade de pasta de cimento constante, a redução de porosidade dos agregados aumenta o módulo em até 16 GPa.

Figura 6.29 Correlação entre os valores de módulo de elasticidade e resistência à compressão dos concretos em função dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade, e do natural (a), e em função da relação a/c (b).

CARRIJO (2005) demonstra que os modelos de correlação teóricos propostos, tais como a proposição de HELENE e a do CEB/FIP, não se ajustam para os agregados menos densos.

6.5 Conclusões do capítulo

Com base nos resultados aqui apresentados, pode-se concluir que a classificação visual da fração mineral do RCD em cinza e vermelho é pouco efetiva para controlar a qualidade dos agregados de RCD reciclados e dos concretos.

O abatimento dos concretos assim como o consumo de aditivo foi influenciado pela massa específica no estado fresco, que é influenciada pela massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados. Esse parâmetro não corresponde à trabalhabilidade do concreto. As medidas de absorção de água e de porosidade dos concretos estão correlacionadas com a porosidade teórica prevista por uma simplificação do modelo de Powers. Essa propriedade assim como o módulo de elasticidade são mais influenciados pela porosidade desses agregados, que está correlacionada com a massa específica aparente, do que pela relação a/c ou consumo

de cimento. Já a resistência à compressão é influenciada, tanto pela porosidade da pasta como pela porosidade do agregado.

Os agregados no intervalo “ $d < 2,2$ ” demandam elevado consumo de cimento para atingir valores elevados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos, além de possuírem valores de absorção de água elevados, podendo necessitar de controle nas condições de aplicação em que a durabilidade dos concretos é um requisito importante.

Os agregados no intervalo “ $d > 2,2$ ” podem ser utilizados em concretos estruturais convencionais, por apresentarem comportamento mecânico e absorção de água similares aos produzidos com agregados naturais. Do ponto de vista industrial, podem-se empregar equipamentos de concentração gravítica da Engenharia Mineral, tais como o jig ou outros.

Nesse estudo, as propriedades mecânicas dos concretos puderam ser controladas através da determinação dos teores dos aglomerantes e da fase cerâmica vermelha, por serem os grupos de materiais presentes nesses agregados sistematicamente mais porosos que as rochas. Quando inferiores a 20%, são adequados para uso em concretos estruturais convencionais.

7 CONCLUSÕES

Para uma dada porosidade (ou relação água/cimento) de pasta de cimento, a porosidade (ou massa específica aparente) dos agregados de RCD reciclados separados por densidade controla o comportamento mecânico dos concretos. Nos agregados estudados, a porosidade (ou massa específica aparente) desses agregados, bem como o comportamento mecânico dos concretos, foram também correlacionados com a soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha, que são os grupos de materiais mais porosos presentes nesses agregados.

A separação por densidade é uma técnica tradicional de tratamento de minérios que foi eficiente para separar os agregados graúdos de RCD reciclados de acordo com as porosidades, gerando concretos com comportamento mecânico e absorção de água similares. Essa técnica também reduziu a heterogeneidade da composição de fases desses agregados. O cimento amianto e betume estão concentrados, de forma mais significativa (até 10% da massa), nos intervalos menos densos dos agregados de RCD reciclados, “ $d < 1,9$ ”. O teor de cerâmica vermelha decresce com o aumento da massa específica aparente desses agregados, não sendo presente no intervalo “ $d > 2,5$ ”, em que o teor de rochas é majoritário (valores superiores a 80% da massa).

O estudo realizado aponta para uma densidade de corte em torno de 2,2 a 2,3 g/cm³. Os agregados contidos no intervalo “ $d > 2,2$ ” possuem teores elevados de rochas e teores baixos de cerâmica vermelha, resultando em concretos com comportamento mecânico semelhante ao dos agregados naturais analisados. Outra densidade de corte poderia se situar em torno de 1,9 g/cm³, pois abaixo desta encontra-se material muito poroso, cerâmica vermelha, e contaminantes como cimento amianto, madeira, plásticos e betume.

A avaliação da distribuição de densidade pode ser um método simples e rápido para a classificação de lotes desses agregados, e controle do comportamento mecânico dos concretos produzidos.

Do ponto de vista químico e mineralógico, os aglomerantes presentes nos agregados de RCD reciclados podem ser estimados pela fração solúvel do ataque com solução de HCl 33%, calculado pelo resíduo insolúvel seco a 100°C, desde que não exista presença de rochas calcárias. Já os argilominerais podem ser estimados pela perda de massa da análise termogravimétrica desse resíduo insolúvel entre 150 e 1.000°C.

A presença de gesso foi desprezível nos agregados de RCD reciclados nacionais. Os argilominerais são originados da rocha, da cerâmica vermelha e da provável presença de solo nas frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados, especialmente na fina. Na fração graúda e miúda, os teores de rochas e cerâmicas são superiores a 50% da massa, e o comportamento dos principais óxidos da composição química é semelhante. Esse comportamento muda significativamente na fração fina, em que predominam os aglomerantes e argilominerais (teores superiores a 77%). A influência dos argilominerais no desempenho do concreto deve ser avaliada melhor.

A origem (Itaquera e Vinhedo) e a cominuição influenciaram, de forma representativa, na distribuição de massa dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade. Os agregados de Itaquera apresentaram mais de 70% da massa dos agregados graúdos de RCD reciclados no intervalo de densidade superior a 2,2 g/cm³. Os agregados de Vinhedo apresentaram maior teor de cerâmica vermelha, especialmente no intervalo de densidade entre 1,7 e 1,9 g/cm³. Os teores de cerâmica vermelha no RCD vermelho não ultrapassaram 24,2%, apesar desses teores serem inferiores a 5% no RCD cinza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7.211: agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

_____. NBR 8.522: concreto: determinação do módulo de elasticidade estática e diagrama – tensão – deformação. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 10.004: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987a.

_____. NBR 7.217: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987b.

_____. NBR 9.937: agregados: determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987c.

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

_____. NBR 9.833: concreto fresco: determinação da massa específica e do teor de ar aprisionado pelo método gravimétrico - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

ALAEJOS, P. G.; SÁNCHEZ, M. J.. Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings**. França: Elsevier publications, 2004. v. 2. p. 693-702.

ALAEJOS, P. G. *et al.* Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings**. França: Elsevier Publications, 2004. v. 1. p. 511-525.

ANCIA, P. *et al.* The use of mineral processing techniques for the improvement of the building rubble characteristics. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1999, San Sebastián. **Proceedings**. Warrendale: TMS/INASMET, 1999. p. 583-598.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DO ESTADO DO PERNAMBUCO (ITEP). **Tratamento de minérios e hidrometalurgia**: in memoriam professor Paulo Abib Andery. Recife: ITEP, 1980. p. 115-133.

ANGULO, S. C. **Produção de concretos com agregados reciclados**. 1998. 86p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Departamento de Construção Civil, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 1998.

_____. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Determinação dos teores de concreto e argamassa em agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais**: São Paulo: IBRACON, 2001. CD-ROM.

ANGULO, S. C. *et al.* Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5, 2002, São Paulo. **Anais**: São Paulo: IBRACON/IPEN. 2002a. p. 293-307.

ANGULO, S. C. *et al.* Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDING, 3, 2002, Oslo. **Proceedings**. Noruega: [s.n.], 2002b. CD-ROM.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição**. Câmara Ambiental da Construção. São Paulo, 2002a. 15 p. (documento interno).

_____. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais**. Paraná: ANTAC, 2002b. p. 1.613-1.624.

ANGULO, S. C. *et al.* Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 6, 2003, São Paulo. **Anais**: IBRACON/IPEN. 2003a. CD-ROM.

ANGULO, S. C. *et al.* Construction and demolition waste management in Brazil. **Waste Management World**, London, Mar/Apr, p. 54-57, 2003b.

ANGULO, S. C. *et al.* Characterisation and recyclability of construction and demolition waste in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL IMPLICATIONS WITH ALTERNATIVE MATERIALS, 5, 2003, San Sebastian. **Proceedings**. Espanha: ISCOWA/INASMET, 2003c. p. 209-218.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Variabilidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, Brasil, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2004.

- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS (ASTM). C 129: standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregates. Washington, 1993.
- AZEVEDO, R. M. B. Areia para construção. In: GOVERNO ESTADO DE SÃO PAULO; PRO-MINÉRIO; IPT. **Mercado Produtor Mineral do estado de São Paulo: levantamento e análise**. São Paulo: Pró-Minério/IPT, 1990. 188p.
- BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado**. 1996. 223p. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de la Catalunya. Barcelona, 1996.
- BETEJTIN, A. **Curso de mineralogia**. Moscou: Mir, 1970. 734 p.
- BIANCHINI, G. *et al.* Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical and mineralogical appraisal. **Waste Management**, n. 25, p. 149-159.
- BOSSINK, B.A.G.; BROUWERS, H.J.H. Construction waste: quantification and source evaluation. **Journal of Construction Engineering and Management**, n. 122, Mar., p. 55-60, 1996.
- BREUER, H. *et al.* Gravity separation of rubble – a contribution to the closed cycle of raw material usage. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 20, 1997, Aachen. **Proceedings**. Alemanha: GMD, 1997. p. 445-456.
- BURT, R.O. **Gravity concentration technology**. Amsterdam: Elsevier, 1984. v. 5. 605 p.
- BUYLE-BODIN, F. HADJIEVA-ZAHARIEVA, R. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. **Materials and Structures**, v. 35, p. 504-509, 2002.
- BRITO, J.A. Cidade versus entulho. **Areia&Brita**, p.22-26, out/dez., 1998.
- CALLISTER, W. **Materials science and engineering: an introduction**. New York: Wiley, 2000. 871 p.
- CAMPOS, A.R.; LUZ, A. B. Separação em meio denso. In: LUZ, A.B. *et al.* **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT, 1998. p. 299-337.
- CARNEIRO, A.P. *et al.* Construction waste characterisation for production of recycled aggregate – Salvador/Brazil. In: WASTE MATERIALS IN CONSTRUCTION, 4, 2000, Leeds. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier, 2000. p. 825-835.
- 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. 129p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- COELHO, P. E.; CHAVES, A. P. Reciclagem de entulho – uma opção de negócio potencialmente lucrativa e ambientalmente simpática. **Areia&Brita**, São Paulo, n. 4, p.31-35, abr./jun., 1998.
- CHAVES, A.P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Signus, 1996. 2 v. 424p.
- CHI, J. M. *et al.* Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. **Cement & Concrete Composites**, n.25, p. 197-205, 2003.
- CHRISTENSEN, N.T. *et al.* Harmful substances in building waste in the future – inventory and prediction of twelve substances. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDING, 3, 2002, Oslo. **Proceedings**. Noruega: [s.n.], 2002. CD-ROM.
- COLLINS, R. Recycled concrete. **Quarry management**, v. 24, n.12, p.31-36, dec., 1997.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307**. Brasília, 2002.
- COSTA, A. C. S. *et al.* Clay mineralogy and cation exchange capacity of Brazilian soils from water contents determined by thermal analysis. **Thermochimica acta**, n. 413, p. 73-79, 2004.
- DIJK, K. *et al.* Recycling technology in the clay brick industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDING, 3, 2002, Oslo. **Proceedings**. Noruega: [s.n.], 2002. CD-ROM.
- DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). DIN 4226-100: aggregates for mortar and concrete – part 100: recycled aggregates. Germany, 2002.
- DWECK, J. *et al.* Hydration of cement bended with calcium carbonate. **Thermochimica acta**, n. 346, p. 105-113, 2000.
- EUROPEAN COMMISSION (EC). **Management of construction and demolition waste**. 2000. Disponível em: <http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment>>. Acessado em: 15 sep., 2002. (DG ENV E.3).
- ELIAS-OZKAN, S.T. Recycling rubble into aggregates: a model for local governments. **Habitat International**, n. 25, p. 493-502, 2001.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States**. United States: [s.n.]. 1998. 100 p. (Report nºEPA530-R-98-010).

- FARINA, E. M. M. Q. *et al.* **Padrão de concorrência e competitividade da indústria de materiais de construção**. São Paulo: Editora Singular, 1997. 266 p.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FWA). **Recycled materials in European highway environments: uses, technologies, and policies**. United States: U. S. Department of Transportation, 2000. 94p.(FHWA-PL-00-025).
- FERRAZ, G.R. *et al.* Estações de classificação e transbordo na cidade de São Paulo. **In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL**, 4, 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: IBRACON/IPEN, 2001. p.75-86.
- FREIRE, L.; BRITO, J. Custos e benefícios da demolição seletiva. **In: CONSTRUÇÃO 2001**, 2001, Lisboa. **Anais**. Portugal: Instituto Superior Técnico, 2001. p. 863-870.
- GAVILAN, R.M.; BERNOLD, L.E. Source evaluation of Solid Waste in Building Construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, n. 120, p.536-552, Dec., 1994.
- GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. New York: MacGraw-Hill, 1932. 554p.
- GOES, M. A. C *et al.* Amostragem. **In: LUZ, A.B. et al. Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT, 1998. p. 17-57.
- GÓMEZ-SOBERÓN, J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - an experimental study. **Cement and concrete research**, v.32, p.1301-1311, 2002.
- GRIM, R. E. **Clay mineralogy**. London: Editora Mac Graw-Hill, 1953. 384 p.
- GRUBL, P.; RUHL, M. German Committee for Reinforced Concrete (DafStb) – Code: Concrete with recycled aggregates. 1998. Disponível em: < <http://www.b-i-m.de/artikel.asp> >. Acessado em: July, 10 2002.
- HANISCH, J. Current developments in the sorting of building waste. **Aufbereitungs-technik**. v. 39, n. 10, 1998.
- HANSEN, T.C. **Rilem report 6 – recycling of demolished concrete and masonry**. London: E& FN SPON/Chapman & Hall, 1992. 305p.
- HARDER, M.K.; FREEMAN, L.A. Analysis of the volume and composition of construction waste arriving at landfill. **In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUILDING AND THE ENVIRONMENT**, 2, 1997, Paris. **Proceedings**. Paris: CSTB, 1997. p. 595-602.
- HELENE; P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

- HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- HENDRIKS, C.F. **The building cycle**. Holanda: Aeneas, 2000. 231 p.
- HENDRIKS, C. F. **A new vision on the building cycle**. Holanda: Aeneas, 2004. 251 p.
- HENDRIKS, C.F.; JANSSEN, G. M. T. Application of construction and demolition waste. **Heron**, v. 46, n. 2 , p. 79-88, 2001.
- HOBBS, G.; HURLEY, J. Deconstruction and reuse of construction materials. **In: CHINI, A.R. Deconstruction and material reuse: technology, economy and policy**. Florida: CIB, 2001. p. 98-124. (Publication 266).
- HORVÁTH, E. *et al.* Thermal treatment of mechanochemically activated kaolinite. **Thermochimica acta**, n. 404, p. 227-234, 2003.
- HUANG, W. L *et al.* Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. **Resources, Conservation and recycling**, n. 37, p. 23-37, 2002.
- INNER SIDNEY WASTE BOARD (ISWB). A draft specification for supply of recycled material for roads, drainage and fills. 2001. Disponível em: <<http://www.wasteboards.nsw.gov.au/construction/default.htm>>. Acessado em: Sep., 22 2002.
- JONES, M. P. **Applied mineralogy – a quantitative approach** United States: Graham & Trotman, 1987. 259p.
- JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 189 p. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- JOHN, V.M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO – RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, 2000, São Paulo. **Anais**. São Paulo: CETESB, 2000. CD-ROM.
- JOHN, V. M. *et al.* Sobre a necessidade de uma metodologia de pesquisa e desenvolvimento para a reciclagem. In: FÓRUM DAS UNIVERSIDADES PÚBLICAS PAULISTAS – CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS, 2003, São Pedro. **Anais**. Ribeirão Preto: USP/ UNICAMP/UNESP/UFSCAR/IPT/IPEN, 2003. CD-ROM.

- JOHN, V. M.; ANGULO, S. C. Metodologia para o desenvolvimento de reciclagem de resíduos. **In:** JOHN, V. M.; ROCHA, J. C. **Utilização de resíduos na Construção Habitacional**. Porto Alegre: ANTAC, 2003. v.4. p. 8-71.
- JOHN, V.M. *et al.* Strategies for innovation in construction and demolition waste management in Brazil. **In:** CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 2004, Toronto. **Proceedings**. Canadá: National Research Council of Canada, 2004. CD-ROM.
- JUNGSMANN, A *et al.* Building rubble treatment using alljig in Europe and USA. **Aufbereitungs-technik**. v. 38, n. 10, p. 543-549, 1997
- JUNGSMANN, A.; QUINDT, J. alljig - technology for separation of building rubble and other secondary raw materials. **In:** GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1999, San Sebastian. **Proceedings**. Warrendale : TMS/NASMET, 1999. p. 367-379.
- KAHN, H. Caracterização de matérias-primas minerais associadas a complexos alcalino-carbonatíticos. 1999. 216p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- KASAI, Y. Guidelines and the present state of the reuse of demolished concrete in Japan. **In:** INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY, 3, 1994, Odense. **Proceedings**. London: E&FN Spon, 1994. p. 93-102.
- KELLY, E. C.; SPOTTISWOOD, J. **Introduction to mineral processing**. New York: John Wiley, 1982. 492p.
- KIBERT, C. J.; CHINI, A. R. Deconstruction as an essential component of sustainable construction. **In:** KIBERT, C.J.; CHINI, A.R. **Deconstruction and material reuse: technology, economy and policy**. Florida: CIB, 2000. p.6-13. (CIB Publication 252).
- KLEIN, C.; HURBURN, C. S. **Manual of mineralogy**. New York: John Wiley, 1993.
- KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. Optimizing the use of RCA. 2000. Disponível em: <http://www.b-im.de/public/deutag_remex/kohlerkurkowski.htm>. Acessado em: July, 5 2002.
- KOHLER, G.; PENZEL, U. State-of-art development of demolition rubble recycling aimed to high-grade application. **Aufbereitungs technik**. v. 38, n. 3, p. 119-29, 1997.
- KOLIAS, S. *et al.* Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. **Cement & Concrete Composites**, n. 27, p. 301-313, 2005.

- KOWALCZYK, T *et al.* State of art deconstruction in Netherlands. In: KIBERT, C.J.; CHINI, A.R. **Deconstruction and material reuse: technology, economy and policy**. Florida: CIB, 2000. p. 95-129. (CIB Publication 252).
- KULAIF, Y. **Análise dos mercados de matérias-primas minerais: estudo de caso da indústria e pedras britadas do estado de SP**. 2001. 144p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- KUMAR, R.; BHATTACHARJEE, B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, n. 33, p. 155-164, 2003.
- LAURITZEN, K.E. RILEM Bulletin - International RILEM symposium on demolition and reuse of concrete and masonry. **Materials and Structures**, n.27, p.307-30, 1994.
- LARRARD, F. de. **Concrete mixture proportioning - A scientific approach**. London: E&FN Spon, 1999. 420p.
- LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 204p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.
- LIMBACHIYA, M. *et al.* Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures**, v. 33, n. 233, p. 574-580, 2000.
- LUZ, A.B. *et al.* **Tratamento de minérios**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT, 1998. 676p.
- MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- MEHUS, J. *et al.* Recycled aggregates: a viable alternative for the Norwegian building and construction industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL IMPLICATIONS WITH ALTERNATIVE MATERIALS, 5, 2003, San Sebastian. **Proceedings**. Espanha: ISCOWA/INASMET, 2003. p. 753-762.
- MESTERS, K.; KURKOMSKI, H. Density separation of recycling building materials by means of jig technology. **Aufbereitungs technik**, n. 38, p. 536-542, 1997.
- MOMBER, A. W. The fragmentation of cementious composities in a jaw breaker. **Theoretical and applied fracture mechanics**, n. 38, p. 151-164, 2002.

- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 4 ed. New York: John Wiley, 1997. 704p.
- MOSKALA, R.; SCHNEIDER-KÜHN, U. Wet processing, the indispensable alternative for processing of demolition debris. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 20, 1997, Aachen. **Proceedings**. Alemanha: GMD, 1997. p. 471-478.
- MULDER, E. Re-use of sieve sand from demolition waste. In: international conference on the environmental and technical implications with alternative materials, 3, 1997, Leeds. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier, 1997. p. 699-704.
- MULDER, E. *et al.* Closed materials cycles for concrete and masonry, as part of an integrated process for the reuse of the total flow of C&D waste. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL IMPLICATIONS WITH ALTERNATIVE MATERIALS, 5, 2003, San Sebastian. **Proceedings**. Espanha: ISCOWA/INASMET, 2003. p. 219-229.
- MÜLLER, A. Recycling von Mauerwerkbruch – stand und neue verwertungswege (teil 1). **Ziegelindustrie International**. v. 56, n. 6, p. 17-25, 2003.
- MÜLLER, A.; LINSZ, E. Processing of concrete with high performance sonic impulses. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings**. França: Elsevier publications, 2004. v. 1. p. 123-132.
- NETO, J. A. S. *et al.* Brita. In: GOVERNO ESTADO DE SÃO PAULO; PRO-MINÉRIO; IPT. **Mercado Produtor Mineral do estado de São Paulo: levantamento e análise**. São Paulo: Pró-Minério/IPT, 1990. 188p.
- NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.
- NICOLAI, M. Configuration of economic recycling plants for demolition waste. **Aufbereitungs technik**, v. 36, n. 4, p. 164-68, 1995.
- NORMA MERCOSUL (NM). NM 67: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. NM 53: agregado gráudo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003a.
- _____. NM 248: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.
- OLIVEIRA, M. T. E. *et al.* Resíduos de concreto: classe III versus Classe II. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: IBRACON/IPEN, 2001. p.87-96.

- O'ROURKE, A. Recycling of construction waste – barriers to success. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDING, 3, 2002, Oslo. **Proceedings**. Noruega: [s.n.], 2002. CD-ROM.
- PELLETIERE, D. The economics of downcycling: an overview with illustration from the international used car trade. 2001. Disponível em: <http://www.is4ie.org/images/Pelletiere_paper.pdf>. Acessado em: Sep., 22 2004.
- PERA, J. State of the art report: use of waste materials in construction in western Europe. In: SEMINÁRIO SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. **Anais**. São Paulo: EP-USP, 1996. p.1-20.
- PINTO, T.P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. 1986. 137p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de S'ao Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1986.
- PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- PITARD, F.F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control**. 2 ed. Ann Arbor : CRC Press, 1993. 488 p.
- POON, C. S. *et al.* On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. **Resources, conservation and recycling**. n. 32, p. 157-172, 2001.
- POON, C. S. *et al.* Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**. n. 34, p. 31-36, 2004.
- POWERS, T.C. Physical properties of cement paste. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CHEMISTRY OF CEMENT, 4, 1960, Washington. **Proceedings**. Washington: U.S. Government Office, 1960. v. 2. p. 577-613.
- QUARCIONI, V. A. **Reconstituição de traço de argamassa: atualização do método IPT**. 1998. 188p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- QUARCIONI, V. *et al.* Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassas endurecidas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5, 2003, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ANTAC, 2003. p. 647-662.
- QUEENSLAND. Construction and demolition waste – waste management and resource use opportunities. 2003. 52 p. Disponível em: <<http://www.epa.qld.gov.au>>. Acessado em: Sep., 18 2003.

- RAMACHANDRAN, V. S.; PHIL, D. **Application of differential thermal analysis in cement chemistry**. New York: Chemical Publishing Company, 1969. 308 p.
- RAMACHANDRAN, V. S. *et al.* **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials**. United States: Noyes Publications & William Andrew Publishing, 2003.
- RATTI, G. **Análises químicas na Engenharia Mineral**. 1994. 83 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.
- REID, J. M. Alternative materials in construction: UK experience. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL IMPLICATIONS WITH ALTERNATIVE MATERIALS, 5, 2003, San Sebastian. **Proceedings**. Espanha: ISCOWA/INASMET, 2003. p. 743-752.
- RILEM RECOMMENDATION. Specification for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**, n.27, p.557-59, 1994.
- RUCH, M. *et al.* Selective dismantling of buildings: state of the art and new developments in Europe. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUILDING AND THE ENVIRONMENT, 2, 1997, Paris. **Proceedings**. Paris: CSTB, 1997. p.433-40.
- RÜHL, M. Water absorption capacity of recycled demolition rubbish. In: Darmstadt Concrete. **Proceedings**. 1997. Disponível em: <<http://www.b-i-m.de/public/artikel.asp>>. Acessado em: Sep., 22 2002.
- SÁNCHEZ, M.J.; ALAEJOS, P. G. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings**. França: Elsevier Publications, 2004. v. 1. p. 536-544.
- SANT'AGOSTINHO, L.M.; KAHN, H.. **Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerai**s. São Paulo: Boletim técnico (Escola Politécnica), Universidade de São Paulo, 1997. 29p.
- SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1975. v. 1. 802 p.
- SCHULTMANN, F.; RENTZ, O. The state of deconstruction in Germany. In: KIBERT, C.J.; CHINI, A.R. **Deconstruction and material reuse: technology, economy and policy**. Florida: CIB, 2000. p. 45-69. (CIB Publication 252).
- SCHULTMANN, F. *et al.* Strategies for quality improvement of recycling materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUILDING AND THE ENVIRONMENT, 2, 1997, Paris. **Proceedings**. Paris: CSTB, 1997. p.611-18.
- SCHULTMANN, F. *et al.* Methodologies and guidelines for deconstruction in Germany and France. In: CHINI, A. R. **Deconstruction and material reuse:**

- technology, economy and policy. Florida: CIB, 2001. p. 27-43. (CIB Publication 266).
- SCHNEIDER, D. M. Transporte de resíduos de construção e demolição na cidade de São Paulo. 2003. 103p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- SCHIRMBRAND, H. Modern combined plant for processing gravel and building rubble. **Aufbereitung technik**, v. 40, n. 11, p.525-30, 1999.
- SINDICATO DAS EMPRESAS REMOVEDORAS DE ENTULHO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SIERESP). Panorama do mercado de remoção dos resíduos da construção. In: RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL – NOVA POLÍTICA E INCENTIVO A NOVOS NEGÓCIOS, 2003, São Paulo. São Paulo: SINDUSCON-SP/Prefeitura de SP/SIERESP, 2003. CD-ROM.
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCON-SP). **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SINDUSCON-SP**. PINTO, T. P. *et al.* São Paulo: Obra Limpa/I&T/SINDUSCON-SP, 2005. 48 p.
- SMITH, M.R.; COLLIS, L. **Aggregates – sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes**. 2 ed. London: The Geological Society, 1993. 339 p.
- SOUZA, U.E.L. *et al.* Desperdício de materiais nos canteiros de obras: a quebra do mito. In: SIMPÓSIO NACIONAL – DESPERDÍCIO DE MATERIAIS NOS CANTEIROS DE OBRAS: A QUEBRA DO MITO, 1999, São Paulo. **Anais**. São Paulo: EP-USP/FINEP, 1999. 48 p.
- STEPKOWSKA, E.T. *et al.* Phase transformation on heating of an aged cement paste. **Thermochimica acta**, n. 420, p. 79-87, 2004.
- SUZUKI, M. Recycling for construction and demolition wastes in Japan. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 20, 1997, Aachen. **Proceedings**. Alemanha: GMDB, 1997. p. 457-469.
- SYMONDS. Construction and demolition waste management practices and their economic impact. 1999. Disponível em: <http://europe.eu.int/comm/environment>>. Acessado em: Sep. 14, 2002.
- TANNO, L. C.; MOTTA, J. F. M. Panorama setorial – Minerais industriais. **Cerâmica Industrial**, v.5, n.3, p.37-40, mai/jun, 2000.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic Press, 1990. 475p.
- TOMAS, J. *et al.* Impact crushing of concrete for liberation and recycling. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 20, 1997, Aachen. **Proceedings**. Alemanha: GMDB, 1997. p. 433-444.

- TOMAS, J. *et al.* Liberation and separation of valuables from building material waste. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1999, San Sebastián. **Proceedings**. Warrendale: TMS/INASMET, 1999. p.461-471.
- THOLE. Pre-separation units. Disponível em: <http://www.thole.nl/products/engels/bt_engl.htm>. Acessado em: July, 17 2002.
- TRANKLER, J. O. V *et al.* Environmental impact of demolition waste – an overview on 10 years of research and experience. **Waste management**, v. 16, n. 3, p. 21-26, 1996.
- ULSEN, C. *et al.* Applied Mineralogy characterization of construction and demolition waste from Brazilian recycling plants. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 8, 2004, Àguas de Lindóia. **Proceedings**. São Paulo: ICAM, 2004. p. 763-66.
- VÁZQUEZ, E. *et al.* **Hormigón com áridos reciclados**: una guía de diseno para el material. Barcelona: CIMNE, 2001. 137 p. (Monografía nº 60).
- VILLALBA, G. *et al.* A proposal for quantifying the recyclability of materials. **Resources, conservation and recycling**. n.37, p.39-53, 2002.
- WAHLSTRÖM, M. *et al.* Environmental quality assurance for use of crushed mineral demolition wastes in earth constructions. In: WASTE MATERIALS IN CONSTRUCTION: putting theory into practice, 1997, Leeds. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier, 1997. p. 725-34.
- WHITAKER, W. **Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil**. São Paulo. 2001. 153 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- WILSON, J. Recycling Construction and Demolition Waste: the dutch experience. **Quarry Management**. v. 23, n. 12, 1996. p. 29-36.
- WIRQUIN, E. *et at.* Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité – Application aux bétons de granulats recycles. **Materials and structures**, v. 33, p. 403-08, 2000.
- XING, W. *et al.* Closing the cycle of building materials – recycling of construction and demolition waste by quality improvement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDING, 3, 2002, Oslo. **Proceedings**. Noruega: [s.n.], 2002. CD-ROM.
- YAMAN, O. *et al.* Active and non-active porosity in concrete Part I: Experimental evidence. **Materials and Structures**. v. 35, n. 246, p. 102-109, 2002.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas. 1997. 140p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas. Campinas, 1997.

Apêndice A - Usinas de reciclagem e método de coleta e amostragem

Usina de Vinhedo

Visão geral da usina de reciclagem de Vinhedo

Informações gerais

Entrevista realizada em 1º semestre/ 2002.

Capacidade e produção

Capacidade de produção: 52 m³/dia.

Volume de RCD recebido: 20 m³/dia.

Produção real: 40 m³/dia (77% da capacidade máxima).

Alimentação: fragmentos de dimensão inferior à 30 cm.

Área da usina de 4750 m².

RCD tipo C e V

RCD tipo C (25% v/v): composto por elementos construtivos como contrapiso, viga, bloco, cerâmica vidrada.

RCD tipo V (75% v/v): composto principalmente por blocos, tijolos e argamassas.

RCD tipo C

RCD tipo V

Operações unitárias

Catação

Cominuição em britador de mandíbula.

Classificação por tamanho–peneiras de abertura de malha 4,8; 9,5; 12,7 mm.

Funcionários

Catação (1); Cominuição (1); Alimentação(1); Gerente (1).

Fluxograma de processo

Usina de Itaquera

Detalhe da cominuição	Detalhe da separação magnética e transportadores de correia

Detalhe do da classificação por tamanho	

Informações gerais:

Entrevista realizada em 1º semestre/ 2002.

Capacidade e produção

Capacidade de produção: 3.200 t/dia.

Volume de RCD recebido: 400 t/dia.

Produção real: 400 t/dia (13% da capacidade máxima).

Alimentação: sem controle de dimensão de partículas.

Área da usina: não estimada.

RCD tipo C e V:

Resíduo tipo C (50% v/v): composto por concreto de demolições.

Resíduo tipo V (50% v/v): composto principalmente por blocos, tijolos e argamassas, resíduos mistos de demolições industriais e obras de infraestrutura urbana, podendo conter também concreto como solo.

RCD tipo C	RCD tipo V

Operações unitárias

Catação – antes e após a cominuição.

Cominuição em britador de impacto (marca NORDBERG).

Classificação por peneiramento à seco – cortes em peneiras de abertura de malha 4,8; 20,0; 40,0 mm.

Funcionários

Catação (11); Cominuição (1); Alimentação(1); Apontador (1); Gerente (1).

Fluxograma de processo

Amostragem do RCD mineral

A teoria de Pierre Gy (PITARD, 1993; GOES *et al.*, 1998)

Esta teoria considera que a representatividade de uma amostra é função da massa. Esta massa representativa depende dos fatores apresentados na fórmula abaixo.

$$M = \frac{m \times l \times f \times h \times d^3}{Sa^2} \text{ (Eq. 1)} \quad m = x \times (100 - x) \times \rho \text{ (Eq. 2)}$$

em que:

- M é a massa (gramas).
- m é o fator de composição mineralógica (calculado pela Eq.2), em g/cm³.
- x é o teor mínimo da fase mineral de interesse, em % (m/m).
- ρ é a massa específica seca mínima das fases presentes na amostra, em g/cm³.
- l é o fator de liberação, número adimensional.
- f é o fator de forma das partículas, número adimensional.
- h é o fator de distribuição de tamanho de partículas, número adimensional.
- d é o diâmetro da maior partícula, em cm.
- Sa é a estimativa do erro total de amostragem, em %.

Hipóteses para a amostragem do RCD

As hipóteses consideradas estão listadas abaixo:

- o teor mínimo da fase de interesse foi de 26%, obtido pela soma dos teores de concreto e rochas (fases minerais consideradas de melhor qualidade para o produto agregado), conforme Angulo (2000).
- o valor de massa específica mínima das fases foi de 1,85 g/cm³ (fase cerâmica), conforme Angulo (2000).
- o fator de liberação mineral foi considerado 1; ou seja, nenhuma partícula com mais de uma fase presente.
- o fator de forma das partículas foi considerado 0,5 (valor prático adotado), conforme LUZ *et al.* (1998).
- o diâmetro da maior partícula foi considerado 25,0 mm.
- o fator de distribuição das partículas foi 0,5, pois se trata de uma material cominuído com a remoção da fração fina, conforme LUZ *et al.* (1998).

- o erro total de amostragem adotado foi o desvio-padrão do teor da fase concreto, igual a 0,0924 (desvio maior que o da fase rochas), conforme Angulo (2000).

Resultado

Apêndice B - Método para a determinação dos grupos de materiais nos agregados de RCD reciclados

Procedimento

Adicionar 2,5 g de amostra pulverizada (m_A), passante em peneira de abertura de malha 45 μm , em béquer de 250 mL, e acrescentar 25 mL de solução de ácido clorídrico (HCl) 33% (1:2). Agitar por aproximadamente 10 minutos, com auxílio e bastão de vidro. Manter o béquer em banho-maria por alguns minutos. Filtrar em papel 40 (filtração média), previamente tarado (m_1) em balão volumétrico de 250 mL, lavando-se o resíduo, sequencialmente, com: a) três porções de 20 mL de solução de Na_2CO_3 5%; b) solução de HCl 5% para eliminação do excesso de carbonato; e c) água deionizada até eliminação de cloretos confirmada por teste qualitativo com solução de nitrato de prata (0,1 %). Secar o papel com o resíduo da filtração a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por uma hora. Esfriar em dessecador e pesar (m_2). Calcular o $\text{RI}_{100^\circ\text{C}}$ empregando a eq. 1. Em seguida, uma nova alíquota do resíduo insolúvel é seca a 150°C e a massa (m_3) é determinada. Em seguida, calcinar a 1.000°C e determinar a massa do resíduo insolúvel a 1.000°C (m_4). Calcular a água de constituição dos argilominerais empregando a eq.2.

$$\text{RI}_{100^\circ\text{C}} = \frac{(m_2 - m_1) \times 100}{m_A} \quad (\text{eq. 1}) \quad \text{H}_2\text{O}_{\text{AR}} = \frac{m_3 - m_4}{m_4} \quad (\text{eq. 2})$$

Fluxograma

Apêndice C – Resultados complementares de caracterização

Determinação de íons solúveis nas frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados (Capítulo 4).

RELATÓRIO DE ENSAIO N° 921 077-203

CLIENTE: FUSP – Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo
Avenida Afrânio Peixoto, 14 – Cidade Universitária
CEP 05507-000 – São Paulo - SP
A/C Eng. Sérgio Cirelli Angulo

MATERIAL: Agregado reciclado

NATUREZA DO TRABALHO: Diversos ensaios

REFERÊNCIA: Orçamento DEC/LQM N.º 007/05 de 12.01.2005, Pedido de Ensaio de 11.01.2005 e e-mail de 20.02.2005

1 MATERIAL

Seis (06) amostras recebidas no Laboratório de Química de Materiais (LQM) do IPT em 11.01.2005, no âmbito do Projeto FINEP – Convênio 23.01.0673.00, coordenado pelo Prof. Dr. Vanderley M. John do PCC/EPUSP. Na Tabela 1 estão descritas informações referentes à identificação das amostras.

Tabela 1: Dados das amostras recebidas no LQM

Dados do Cliente	Dados do LQM	
	Massa (g)	Al.º
"Agregado reciclado VIV – 2,4+1,2 #20"	44	18.187
"Agregado reciclado VIV – 19+12 #20"	100	18.188
"Agregado reciclado ITV – 1,2+0,6 #20"	198	18.189
"Agregado reciclado ITV – 25,4+12,5 #20"	112	18.190
"Agregado reciclado ITC – 0,6+0,3 #20"	100	18.191
"Agregado reciclado ITC – 4,5+1,8 #20"	100	18.192

2 MÉTODOS UTILIZADOS

- **Sais, cloreto (Cl) e sulfato (SO₄²⁻) solúveis:** Procedimento DEC-LQM-PE-044 "Agregado para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis", baseado na NBR 9917/87 e procedimento DEC-LQM-PE-064 "Determinação de íons cloreto e fluoreto por potenciometria com eletrodo de íons seletivo – Procedimento de leitura", baseado em diretrizes gerais da NBR 19737/86 e ASTM D 512/89;

Nota 1: A pedido do Cliente, o ensaio de amostra foi executado segundo diretrizes gerais de publicação de QUARCIOM et al. (2003), como adequação do procedimento indicado pela NBR 9917/87, a saber: em um biquar, adicionou-se 20g de agregado e 100ml de água à temperatura ambiente, agitando-se por aproximadamente 10min com agitador magnético; filtrou-se a suspensão em papel de filtração média, recolhendo-se o líquido em balão volumétrico de 500ml.

Os resultados apresentados neste documento têm validade restrita e se aplicam somente ao item ensaiado, ou conforme. Este documento não se presta ao uso do cliente ou do cliente IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita transcritiva, sem nenhuma alteração.

- **pH:** Procedimento DEC-LQM-PE-024 "Água, solução aquosa e extrato aquoso - Determinação de pH – Tratamento de amostra", baseado em diretrizes gerais das NBR 7353/91, NBR 9251/86, NBR 14339/99, CETESB L5.145/78 e Publicação IPT N.º 839/71 e Procedimento DEC-LQM-PE-063 "Determinação do pH – Procedimento de leitura", baseado em diretrizes gerais das NBR 7353/91, NBR 9251/86 e NBR 14339/99;
- **Cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K) solúveis:** Procedimento DEC-LQM-PE-061 "Determinação de metais por espectrofotometria por absorção atômica – Procedimento de leitura", baseado em diretrizes gerais da NBR 13810/97.

Nota 2: Ensaio realizado no filtrado da amostra solubilizada de acordo com o indicado na nota 1.

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- Balança analítica eletrônica Ohaus E12140 (BAL-06) - Certificado de Calibração N.º 56.439 - Laboratório de Metrologia/IPT - Validade: 27.05.2005;
- Espectrofotômetro de absorção atômica - Varian SpectrAA modelo 55B - N.º de série EL03057698 – Relatório de Serviço N.º SP 0388 – Varian - Validade: 01.12.2005;

Nota 3: Equipamento monitorado com soluções-padrão preparadas a partir da seguinte solução estoque:

Cálcio: Calcium Standard Solution 1000mg/L Ca - Atomic Absorption Pure-Graphic™ - Buck Scientific - Lote 85012L

Magnésio: Magnesium Standard Solution 1000mg/L Mg - Atomic Absorption Pure-Graphic™ - Buck Scientific - Lote 84571V

Potássio: Potassium Standard Solution 1000mg/L K (KCl em H₂O) Titmus & - Lote 20150772

Sódio: Sodium Standard Solution 1000mg/L Na (NaCl em H₂O) Titmus & - Lote 70250248

- **Estufa - Marconi Mod MA 3201 - (EST-02) - Verificação Interna - Validade: 25.02.2005;**
Nota 4: Equipamento controlado no LQM por meio de registrador eletrônico (TER-03).

- **Mufa - Fornico (MUF-01) - Patrimônio IPT N.º 25.202 - Verificação Interna - Validade: 25.02.2005;**

Nota 5: Idem nota 4.

- **Registrador eletrônico (termômetro digital) (TER-03) - Certificados de Calibração No.º 52.078 e 52.075 - Laboratório de Metrologia/IPT.**

4 RESULTADOS

Os resultados do ensaio estão apresentados na Tabela 2, a seguir. //

Os resultados apresentados neste documento não representam garantia e os valores somente são tão precisos quanto os métodos utilizados para obtê-los. Este documento não deve ser usado como base para qualquer decisão, pois não é uma garantia. A interpretação dos resultados só poderá ser feita interpretando, sem nenhuma alteração.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT
Av. Prof. Dr. Carlos R. de Faria, 574 - Edifício Iluminista - São Carlos - 13506-900 - São Paulo - SP - Tel. (19) 2369-4000 - www.ipt.br
Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC - Tel. (19) 2369-4000, 2369-4001 e 2369-4002 - Fax (19) 2369-4000 - atendimento@ipt.br

Tabela 2: Resultados de ensaio

Identificação do Cliente	LQM N.º	Resultados, em mg/kg de amostra							
		pH (°C)	Na	K	Ca	Mg	Sais solúveis	Cl-	SO ₄ ²⁻
"Agregado reciclado VIV - 2,4+1,2 #20"	18.187	7,7 (24,3)	23	34	107	25	0,19	31	371
"Agregado reciclado VIV - 19+12 #20"	18.188	7,4 (24,8)	32	61	353	20	0,32	231	767
"Agregado reciclado ITV - 1,2+0,6 #20"	18.189	7,4 (24,4)	186	95	180	5	0,28	54	808
"Agregado reciclado ITV - 25,4+19,1 #20"	18.190	7,3 (24,5)	72	66	231	6	0,31	193	464
"Agregado reciclado ITC-0,6+0,3 #20"	18.191	9,8 (24,7)	62	131	241	1	0,29	61	613
"Agregado reciclado ITC-9,5+4,8 #20"	18.192	7,4 (24,6)	58	129	578	2	0,52	90	551

5 REFERÊNCIA

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEXO, D. M. Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassa endurecidas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5, 2003. São Paulo...Anais, São Paulo: EPUSP-PCCJANTAC, 2003. pg. 647-662.

São Paulo, 22 de fevereiro de 2005.

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil
Lab. de Química de Materiais

Caden. Nº Valdecir Augusto Queiroz
Responsável pelo Laboratório
CREA nº 048127/0 - RJ. nº 214713

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil

Eng.º M.º Luis Tanguito Hernandez
Chefe do Agrupamento de Materiais
CREA nº 048127/0 - RJ. nº 202216

Os resultados apresentados neste documento têm significação técnica e se aplicam somente ao item especificado ou calibrado. Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para qualquer fim, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT
Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária - Butantã - 05508-900 - São Paulo - SP - Tel: (11) 3797-4000 - www.ipt.br
Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC - Tel: (11) 3797-4125, 3797-4456 e 3797-4444 - Fax: (11) 3797-4402 - sac@ipt.br

Curvas de perda de massa da análise termogravimétrica das frações granulométricas dos agregados de RCD reciclados (Capítulo 4).

Frações graúdas - antes do ataque com HCl

Frações graúdas - após o ataque com HCl

Frações miúdas – antes do ataque com HCl

Frações miúdas – após o ataque com HCl

Frações finas – antes do ataque com HCl

Frações finas – após o ataque com HCl

Análise das derivadas da perda de massa da análise termogravimétrica nos produtos separados por densidade (Capítulo 5).

Produtos no intervalo “1,7<d<1,9”

Produtos no intervalo “1,9<d<2,2”

Produtos no intervalo “2,2<d<2,5”

Produtos no intervalo “d>2,5”

Eventos térmicos, picos característicos de temperaturas e suas relações com os aglomerantes e os argilominerais.

	Evento térmico (°C)	Pico caract. (°C)	Análise dos materiais isolados disponível na bibliografia
Antes do ataque com HCl	40-220	95-139	- Perda de água combinada e adsorvida do C-S-H e da etringita (TAYLOR, 1997; RAMANCHANDRAN et al., 2003). - Perda de água adsorvida (SANTOS, 1975; GRIM, 1953).
	220-300	258	- Perda de água das fases hexagonais hidratadas do C ₃ A do aglomerante (RAMANCHANDRAN et al., 2003), associada à primeira temperatura de pico. - Perda de água dos argilominerais sem definição de pico característico de temperatura (SANTOS, 1975; GRIM, 1953; RAMACHANDRAN et al., 2003).
	340-400	338 370	- Perda de água da hidrocalumita (TAYLOR, 1997; RAMACHANDRAN et al., 2003). - Perda de água da brucita (RAMACHANDRAN; PHIL, 1969) dos aglomerantes ou dos argilominerais que contêm Mg na sua composição com pico de temperatura entre 340 e 390°C.
	400-550	461-484	- Perda de água da portlandita dos aglomerantes (RAMANCHANDRAN et al., 2003) encoberta na presença de argilominerais (KOLIAS et al., 2005) ou com pico de temperatura agudo em 480°C. - Perda de água das hidroxilas das espécies químicas Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃ (RAMACHANDRAN et al., 2003) proveniente de argilominerais
	550-1000	592-694 753-772 831-858 887-888 961-969	- Perda do anidrido carbônico dos carboaluminatos e da calcita mal e bem cristalizada até 900 °C (DWECK et al., 2000; STEPKOWSKA et al., 2004; RAMACHANDRAN; PHIL, 1969). - Perda de água gradual da flogopita (RAMACHANDRAN et al., 2003).
Depois do ataque com HCl	40-150	85-109	- Perda de água adsorvida dos argilominerais (SANTOS, 1975; GRIM, 1953).
	150-300	-	- Perda de água dos argilominerais sem definição de pico característico de temperatura (SANTOS, 1975; GRIM, 1953; RAMACHANDRAN et al., 2003).
	300-500	370 465-497	- Perda de água das hidroxilas das espécies químicas Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃ (RAMACHANDRAN et al., 2003) proveniente de argilominerais. - Perda de água da brucita (RAMACHANDRAN; PHIL, 1969) dos argilominerais que contêm Mg na sua composição com pico de temperatura entre 340 e 390°C ou perda de água mais abrupta da ilita conforme GRIM (1953) e outros argilominerais como merlioniata. - O segundo pico se refere à perda da água de constituição da caulinita, ilita, flogopita e merlioniata podendo atingir temperaturas superiores a 500°C dependendo da cristalinidade (SANTOS, 1975; GRIM, 1953; HORVÁTH et al., 2003; COSTA et al., 2004)
	500-700	672	- Perda de água gradual da muscovita (RAMACHANDRAN et al., 2003).
	850-1000	-	- Perda de água gradual da flogopita e muscovita (RAMACHANDRAN et al., 2003).

Perdas de massa da análise termogravimétrica e suas derivadas na cerâmica vermelha, na partícula cimentícia e na rocha (Capítulo 5).

Fases cristalinas e minerais das frações graúdas (Capítulo 4)

	Fases (ficha)	Fórmula	Picos principais		
			d	2θ	Int. rel. (%)
IT V -25,4+19,1 mm	Albita (09-0466)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	3,196	27,92	100,0
			3,780	23,54	25,0
			3,684	24,16	20,0
	Quartzo (46-1045)	SiO_2	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Calcita (05-0586)	CaCO_3	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,43	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Microclínio (19-0932)	KAlSi_3O_8	3,240	27,53	100,0
			3,290	27,10	50,0
			4,220	21,05	45,0
	Flogopita (42-1437)	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	10,050	8,80	100,0
			3,353	26,58	35,0
			2,631	34,08	28,0
	Rosenhaita (29-0378)	$\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})_2)$	2,965	30,14	100,0
			3,199	27,89	75,0
			3,038	29,40	65,0
IT C -9,5+4,8 mm	Sílica (33-1161)	SiO_2	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Albita (09-0946)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	3,196	27,92	100,0
			3,780	23,54	25,0
			6,390	13,86	20,0
	Calcita (47-1743)	CaCO_3	3,035	29,43	100,0
			1,875	48,56	23,2
			2,285	39,44	20,2
	Microclínio (22-0675)	KAlSi_3O_8	3,292	27,09	100,0
			4,225	21,03	58,0
			3,335	26,73	53,0
	Flogopita (10-0495)	$\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	9,940	8,90	100,0
			3,348	26,63	100,0
			2,614	34,31	30,0
VI V -19,1+12,7 mm	Sílica (33-1161)	SiO_2	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Calcita (47-1743)	CaCO_3	3,035	29,43	100,0
			1,875	48,56	23,2
			1,912	47,56	21,7
	Muscovita (07-0025)	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	10,100	8,75	100,0
			3,360	26,53	100,0
			4,490	19,77	90,0
	Albita (01-0739)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	3,200	27,88	100,0
			4,050	21,95	35,0
			3,660	24,32	25,0
	Microclínio (22-0687)	KAlSi_3O_8	3,246	27,48	100,0
			4,213	21,09	51,0
			3,286	27,14	48,0
	Merlionita (29-0989)	$\text{K}_5\text{Ca}_2(\text{Al}_9\text{Si}_{23}\text{O}_{64}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	3,180	28,06	100,0
			7,120	12,43	90,0
			7,080	12,50	90,0
	Ilita (24-0495)	$\text{K}_{0,7}\text{Al}_{2,1}(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2,583	34,73	100,0
			3,350	26,61	65,0
			4,490	19,77	65,0

Fases cristalinas e minerais das frações miúdas (Capítulo 4)

	Fases (ficha)	Fórmula	Picos principais		
			d	2θ	Int. rel. (%)
IT V -1,2+0,6 mm	Quartzo (46-1045)	SiO ₂	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Calcita (05-0586)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Albita (09-0466)	NaAlSi ₃ O ₈	3,196	27,92	100,0
			3,780	23,54	25,0
			3,684	24,16	20,0
	Microclínio (22-0687)	KAlSi ₃ O ₈	3,246	27,48	100,0
			4,213	21,09	51,0
			3,286	27,14	48,0
	Ilita (26-0911)	(K , H ₃ O) Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	3,340	26,69	100,0
			10,000	8,84	90,0
			5,020	17,67	90,0
	Caulinita (06-0221)	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	1,448	64,34	100,0
			3,580	24,87	100,0
			7,180	12,33	100,0
	Gibbsita (07-0324)	Al (OH) ₃	4,850	18,29	100,0
			4,370	20,32	16,0
			4,320	20,56	8,0
IT C -0,6+0,3 mm	Silica (33-1161)	SiO ₂	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Calcita (05-0586)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Albita (09-0466)	NaAlSi ₃ O ₈	3,196	27,92	100,0
			3,780	23,54	25,0
			3,684	24,16	20,0
	Ilita (26-0911)	(K , H ₃ O) Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	3,340	26,69	100,0
			10,000	8,84	90,0
			5,020	17,67	90,0
	Microclínio (19-0932)	KAlSi ₃ O ₈	3,240	27,53	100,0
			3,290	27,10	50,0
			4,220	21,05	45,0
	Gismondina	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ ·4H ₂ O	3,340	26,69	100,0
			4,270	20,80	35,0
			3,190	27,97	18,0
VI V -2,4+1,2 mm	Silica (33-1161)	SiO ₂	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Calcita (47-1743)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			1,875	48,56	23,2
			1,912	47,56	21,7
	Albita (09-0466)	NaAlSi ₃ O ₈	3,196	27,92	100,0
			3,780	23,54	25,0
			3,684	24,16	20,0
	Muscovita (07-0025)	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	10,100	8,75	100,0
			3,360	26,53	100,0
			4,490	19,77	90,0
	Microclínio (19-0926)	KAlSi ₃ O ₈	4,220	21,05	100,0
			3,260	27,36	80,0
			3,250	27,44	80,0

Fases cristalinas e minerais das frações finas (Capítulo 4)

	Fases (ficha)	Fórmula	Picos principais		
			d	2θ	Int. rel. (%)
IT V -0,15 mm	Quartzo (46-1045)	SiO_2	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Calcita (05-0586)	CaCO_3	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Caulinita (29-1048)	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$	7,100	12,47	100,0
			3,560	25,01	100,0
			2,327	38,69	40,0
	Albita (20-0554)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	3,188	27,99	100,0
			4,027	22,07	61,0
			3,214	27,76	58,0
	Microclínio (19-0932)	KAlSi_3O_8	3,240	27,53	100,0
			3,290	27,10	50,0
			4,220	21,05	45,0
	Flogopita (42-1437)	$\text{K} (\text{Mg}, \text{Fe})_3 (\text{Al}, \text{Fe}) \text{Si}_3\text{O}_{10} (\text{OH}, \text{F})_2$	10,050	8,80	100,0
			3,353	26,58	35,0
			2,631	34,08	28,0
	Gibbsita (07-0324)	$\text{Al} (\text{OH})_3$	4,850	18,29	100,0
			4,370	20,32	16,0
			4,320	20,56	8,0
	Muscovita (02-1019)	$(\text{H}, \text{K}) \text{AlSiO}_4$	2,560	35,05	100,0
			3,320	26,85	90,0
			4,470	19,86	90,0
IT C -0,15 mm	Silica (33-1161)	SiO_2	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Calcita (05-0586)	CaCO_3	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Albita (41-1480)	$(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al} (\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$	3,182	28,04	100,0
			3,197	27,91	68,0
			4,031	22,05	27,0
	Microclínio (19-0932)	KAlSi_3O_8	3,240	27,53	100,0
			3,290	27,10	50,0
			4,220	21,05	45,0
	Merlionita (29-0989)	$\text{K}_5\text{Ca}_2 (\text{Al}_9\text{Si}_{23}\text{O}_{64}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	3,180	28,06	100,0
			7,120	12,43	90,0
			7,080	12,50	90,0
	Gibbsita (07-0324)	$\text{Al} (\text{OH})_3$	4,850	18,29	100,0
			4,370	20,32	16,0
			4,320	20,56	8,0
	Etringita (41-1451)	$\text{Ca}_6\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 (\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	9,720	9,10	100,0
			5,610	15,80	76,0
			3,873	22,96	31,0
VI V -0,15 mm	Silica (33-1161)	SiO_2	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Calcita (05-0586)	CaCO_3	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Muscovita (07-0042)	$(\text{K}, \text{Na}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	9,970	8,87	100,0
			3,331	26,76	100,0
			4,990	17,77	55,0
	Microclínio (22-0687)	KAlSi_3O_8	3,246	27,48	100,0
			4,213	21,09	51,0
			3,286	27,14	48,0

	Albita (41-1480)	$(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$	3,182	28,04	100,0
			3,197	27,91	68,0
			4,031	22,05	27,0
	Gibbsite (07-0324)	$\text{Al}(\text{OH})_3$	4,850	18,29	100,0
			4,370	20,32	16,0
			4,320	20,56	8,0
	Caulinita (29-1490)	$\text{Na}_{0,3}\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	7,240	12,22	100,0
			4,310	20,61	65,0
			3,550	25,08	65,0

Fases cristalinas e minerais dos produtos 1,7 < d < 1,9 (Capítulo 5)

	Fases (ficha)	Fórmula	Picos principais		
			d	2θ	Int. rel. (%)
IT V -19,1+12,7 mm	Silica (33-1161)	SiO ₂	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Calcita (24-0027)	CaCO ₃	3,030	29,48	100,0
			1,873	48,61	34,0
			3,852	23,09	29,0
	Ortoclásio (08-0048)	K (Al , Fe) Si ₂ O ₈	3,240	27,53	100,0
			3,780	23,54	70,0
			3,320	26,85	70,0
	Hidrocalumita (16-0333)	Ca ₂ Al (OH) ₇ ·3H ₂ O	7,860	11,26	100,0
			3,930	22,63	60,0
			2,890	30,94	50,0
	Bassanita (33-0310)	CaSO ₄ ·0.5H ₂ O	3,006	29,72	100,0
			2,807	31,88	85,0
			6,000	14,76	70,0
	Merlionita (29-0989)	K ₅ Ca ₂ (Al ₉ Si ₂₃ O ₆₄) ·24H ₂ O	3,180	28,06	100,0
			7,120	12,43	90,0
			7,080	12,50	90,0
IT C -19,1+12,7 mm	Quartzo (46-1045)	SiO ₂	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Calcita (05-0586)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Dolomita (36-0426)	CaMg (CO ₃) ₂	2,888	30,96	100,0
			2,193	41,16	19,0
			1,787	51,11	13,0
	Microclínio (12-0703)	KAlSi ₃ O ₈	3,260	27,36	100,0
			4,250	20,90	40,0
			2,160	41,82	25,0
VI V -25,4+19,1 mm	Silica (33-1161)	SiO ₂	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Microclínio (01-0705)	KAlSi ₃ O ₈	3,250	27,44	100,0
			4,280	20,75	38,0
			3,350	26,61	25,0
	Montmorilonita (11-0303)	(Al (OH) ₂) _{0.33} Al ₂ (Si _{3.67} Al _{0.33} O ₁₀) (OH) ₂	11,100	7,96	100,0
			3,170	28,15	37,0
			5,405	16,40	3,0
	Hematita (13-0534)	Fe ₂ O ₃	2,690	33,31	100,0
			1,690	54,28	60,0
			2,510	35,77	50,0

Fases cristalinas e minerais dos produtos 1,9 < d < 2,2 (Capítulo 5)

	Fases (ficha)	Fórmula	Picos principais		
			d	2θ	Int. rel. (%)
IT C -12,7+9,5 mm	Quartzo (46-1045)	SiO ₂	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Calcita (47-1743)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			1,875	48,56	23,2
			1,912	47,56	21,7
	Anortoclásio (09-0478)	(Na , K) (Si ₃ Al) O ₈	3,211	27,78	100,0
			3,243	27,50	90,0
			4,106	21,64	16,0
	Hidrocalumita (16-0333)	Ca ₂ Al (OH) ₇ ·3H ₂ O	7,860	11,26	100,0
			3,930	22,63	60,0
			2,890	30,94	50,0
	Merlionita (29-0989)	K ₅ Ca ₂ (Al ₉ Si ₂₃ O ₆₄) ·24H ₂ O	3,180	28,06	100,0
			7,120	12,43	90,0
			7,080	12,50	90,0
IT V -12,7+9,5 mm	Quartzo (46-1045)	SiO ₂	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Calcita (24-0027)	CaCO ₃	3,030	29,48	100,0
			1,873	48,61	34,0
			3,852	23,09	29,0
	Anortoclásio (09-0478)	(Na , K) (Si ₃ Al) O ₈	3,211	27,78	100,0
			3,243	27,50	90,0
			4,106	21,64	16,0
	Muscovita (07-0042)	(K , Na) (Al , Mg , Fe) ₂ (Si _{3,1} Al _{0,9}) O ₁₀ (OH) ₂	9,970	8,87	100,0
			3,331	26,76	100,0
			4,990	17,77	55,0
VI V -25,4+19,1 mm	Silica (33-1161)	SiO ₂	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Calcita (05-0586)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Microclínio (19-0926)	KAlSi ₃ O ₈	4,220	21,05	100,0
			3,260	27,36	80,0
			3,250	27,44	80,0
	Ilita (26-0911)	(K , H ₃ O) Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	3,340	26,69	100,0
			10,000	8,84	90,0
			5,020	17,67	90,0
	Aluminato de cálcio hidratado (16-0339)	Ca ₂ Al (OH) ₇ ·6.5H ₂ O	7,920	11,17	100,0
			3,990	22,28	80,0
			2,870	31,16	60,0

Fases cristalinas e minerais dos produtos 2,2< d< 2,5 (Capítulo 5)

	Fases (ficha)	Fórmula	Picos principais		
			d	2θ	Int. rel. (%)
IT C -9,5+4,8 mm	Quartzo (46-1045)	SiO ₂	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Calcita (05-0586)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Anortoclásio (09-0478)	(Na , K) (Si ₃ Al) O ₈	3,211	27,78	100,0
			3,243	27,50	90,0
			4,106	21,64	16,0
	Albita (20-0548)	(Na , Ca) (Si , Al) ₄ O ₈	3,211	27,78	100,0
			3,184	28,02	64,0
			4,042	21,99	52,0
	Merlionita (29-0989)	K ₅ Ca ₂ (Al ₉ Si ₂₃ O ₆₄) ·24H ₂ O	3,180	28,06	100,0
			7,120	12,43	90,0
			7,080	12,50	90,0
IT V -12,7+9,5 mm	Quartzo (46-1045)	SiO ₂	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Calcita (05-0586)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Albita (41-1480)	(Na , Ca) Al (Si , Al) ₃ O ₈	3,182	28,04	100,0
			3,197	27,91	68,0
			4,031	22,05	27,0
	Flogopita (10-0495)	KMg ₃ (Si ₃ Al) O ₁₀ (OH) ₂	9,940	8,90	100,0
			3,348	26,63	100,0
			2,614	34,31	30,0
	Microclínio (01-0705)	KAlSi ₃ O ₈	3,250	27,44	100,0
			4,280	20,75	38,0
			3,350	26,61	25,0
	Hidrocalumita (16-0333)	Ca ₂ Al (OH) ₇ ·3H ₂ O	7,860	11,26	100,0
			3,930	22,63	60,0
			2,890	30,94	50,0
VI V -9,5+4,8 mm	Silica (33-1161)	SiO ₂	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Albita (09-0466)	NaAlSi ₃ O ₈	3,196	27,92	100,0
			3,780	23,54	25,0
			3,684	24,16	20,0
	Calcita (24-0027)	CaCO ₃	3,030	29,48	100,0
			1,873	48,61	34,0
			3,852	23,09	29,0
	Microclínio (19-0932)	KAlSi ₃ O ₈	3,240	27,53	100,0
			3,290	27,10	50,0
			4,220	21,05	45,0
	Merlionita (29-0989)	K ₅ Ca ₂ (Al ₉ Si ₂₃ O ₆₄) ·24H ₂ O	3,180	28,06	100,0
			7,120	12,43	90,0
			7,080	12,50	90,0
	Rosenhaita (29-0378)	Ca ₃ (Si ₃ O ₈ (OH) ₂)	2,965	30,14	100,0
			3,199	27,89	75,0
			3,038	29,40	65,0

Fases cristalinas e minerais dos produtos d > 2,5 (Capítulo 5)

	Fases (ficha)	Fórmula	Picos principais		
			d	2θ	Int. rel. (%)
IT C -25,4+19,1 mm	Silica (33-1161)	SiO ₂	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Albita (10-0393)	Na (Si ₃ Al) O ₈	3,176	28,10	100,0
			3,752	23,71	30,0
			3,211	27,78	30,0
	Ortoclásio (22-1212)	KAlSi ₃ O ₈	3,310	26,94	100,0
			3,780	23,54	74,0
			3,280	27,19	59,0
	Scawtita (31-0261)	Ca ₇ (Si ₆ O ₁₈) (CO ₃) ·2H ₂ O	3,020	29,58	100,0
			3,204	27,85	55,0
			3,030	29,48	45,0
Flogopita (42-1437)	K (Mg , Fe) ₃ (Al , Fe) Si ₃ O ₁₀ (OH , F) ₂	10,050	8,80	100,0	
		3,353	26,58	35,0	
		2,631	34,08	28,0	
IT V -25,4+19,1 mm	Silica (33-1161)	SiO ₂	3,342	26,67	100,0
			4,257	20,87	22,0
			1,818	50,18	14,0
	Albita (41-1480)	(Na , Ca) Al (Si , Al) ₃ O ₈	3,182	28,04	100,0
			3,197	27,91	68,0
			4,031	22,05	27,0
	Microclínio (19-0932)	KAlSi ₃ O ₈	3,240	27,53	100,0
			3,290	27,10	50,0
			4,220	21,05	45,0
	Calcita (05-0586)	CaCO ₃	3,035	29,43	100,0
			2,285	39,44	18,0
			2,095	43,18	18,0
	Muscovita (34-0175)	(K , Na) Al ₂ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	9,980	8,86	100,0
			2,554	35,14	89,0
			2,566	34,97	86,0
	Magnesiohornblenda (45-1371)	Ca ₂ (Mg , Fe + ₂) ₄ Al (Si ₇ Al) O ₂₂ (OH , F) ₂	3,123	28,58	100,0
			8,407	10,52	95,0
			2,711	33,04	39,0
Lizardita (11-0388)	Mg _{4.5} Al _{1.5}) (Si _{2.5} Al _{1.5}) O ₁₀ (OH) ₈	7,090	12,48	100,0	
		3,551	25,08	100,0	
		2,377	37,85	80,0	
VI V -19,1+12,7 mm	Quartzo (46-1045)	SiO ₂	3,343	26,67	100,0
			4,255	20,88	16,0
			1,818	50,18	13,0
	Albita (09-0466)	NaAlSi ₃ O ₈	3,196	27,92	100,0
			3,780	23,54	25,0
			3,684	24,16	20,0
	Clinocloro (29-0701)	(Mg , Fe) ₆ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	7,070	12,52	100,0
			3,540	25,16	60,0
			14,100	6,27	35,0
	Scawtita (42-1436)	Ca ₇ Si ₆ (CO ₃) O ₁₈ ·2H ₂ O	3,019	29,59	100,0
			2,992	29,86	74,0
			3,545	25,12	53,0
	Ortoclásio (31-0966)	KAlSi ₃ O ₈	3,310	26,94	100,0
			3,770	23,60	80,0
			4,220	21,05	70,0
	Muscovita (01-1098)	H ₂ KAl ₃ (SiO ₄) ₃	2,560	35,05	100,0
			9,900	8,93	60,0
			4,470	19,86	53,0

Apêndice D – Análise Estatística

Capítulo 4 (item 4.3.4) - Influência da origem ou natureza dos agregados de RCD reciclados

Teste de normalidade

Os gráficos abaixo mostram que os teores ponderados dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e CaO e perda ao fogo na análise química das frações granulométricas (-25,4+0,15 mm) dos agregados de RCD reciclados seguem uma distribuição normal.

Análise de variância

As tabelas abaixo mostram os resultados da análise de variância para os teores ponderados dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e CaO e perda ao fogo na análise química das frações granulométricas (-25,4+0,15 mm) dos agregados de RCD reciclados.

a) Teores de SiO_2 .

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	2	212,3	106,1	4,43	0,02*
Erro	24	575,3	24,0		
Total	26	787,6			

* Existe diferença significativa entre a média dos tratamentos.

b) Teores de Al_2O_3 .

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	2	6,34	3,17	1,04	0,37
Erro	24	73,13	3,05		
Total	26	79,47			

c) Teores de CaO .

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	2	40,47	20,23	7,18	0,004*
Erro	24	67,65	2,82		
Total	26	108,12			

* Existe diferença significativa entre a média dos tratamentos.

d) Perda ao fogo.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	2	30,11	15,06	8,22	0,002*
Erro	24	43,95	1,83		
Total	26	74,06			

* Existe diferença significativa entre a média dos tratamentos.

Comparação múltipla de médias

As tabelas abaixo mostram os resultados da comparação múltipla das médias dos teores ponderados dos óxidos SiO_2 , CaO e perda ao fogo na análise química das frações granulométricas (-25,4+0,15 mm) dos agregados de RCD reciclados.

a) Teores de SiO_2 .

	IT C	IT V	VI V
IT C			
IT V	-5,01 +4,52		
VI V	+1,06 +10,59	+1,30 +10,83	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

b) Teores de CaO .

	IT C	IT V	VI V
IT C			
IT V	-2,89 +0,37		
VI V	-4,62 -1,35	-3,36 -0,09	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

c) Perda ao fogo.

	IT C	IT V	VI V
IT C			
IT V	-2,25 +0,39		
VI V	-3,87 -1,24	-2,94 -0,31	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

Capítulo 4 (item 4.5) - Estimativa dos teores de aglomerantes e de argilominerais

Análise de variância

As tabelas abaixo mostram os resultados da análise de variância para os teores dos grupos de materiais das frações granulométricas “0,15 mm”, “4,8+0,15 mm” e “25,4+4,8 mm”.

a) Teores de aglomerantes.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	2	3661,3	1830,7	120,71	0,000*
Erro	6	91,0	15,2		
Total	8	3752,3			

* Existe diferença significativa entre a média dos tratamentos.

b) Teores de argilominerais.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	2	2.641,0	1.320,5	23,04	0,002*
Erro	6	343,8	57,3		
Total	8	2.984,8			

* Existe diferença significativa entre a média dos tratamentos.

Comparação múltipla das médias

As tabelas abaixo mostram os resultados da comparação múltipla das médias dos teores dos grupos de materiais.

a) Teores de aglomerantes.

	-25,4+4,8 mm	-4,8+0,15 mm	-0,15 mm
-25,4+4,8 mm			
-4,8+0,15 mm	-10,91 +4,65		
-0,15 mm	+33,35 +48,91	+36,48 +52,05	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

b) Teores de argilominerais.

	-25,4+4,8 mm	-4,8+0,15 mm	-0,15 mm
-25,4+4,8 mm			
-4,8+0,15 mm	-10,32 +19,92		
-0,15 mm	+23,38 +53,62	+18,58 +48,82	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

Capítulo 5 (item 5.3) - Distribuição de fases e as propriedades físicas nos intervalos de densidade

Fase cimentícia

Teste de normalidade

As figuras abaixo mostram que as distribuições dos valores de massa específica aparente (a) e de absorção de água (b) da fase “cimentícia” nos intervalos de densidade seguem uma distribuição normal. Foi necessária a exclusão de dois valores de absorção de água, um em cada intervalo de densidade.

(a) massa esp. aparente

(b) absorção de água

Análise de variância

As tabelas abaixo apresentam os resultados da análise de variância dos valores de massa específica aparente e absorção de água da fase “cimentícia” nos intervalos de densidade.

a) Massa específica aparente.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	3	2,21	0,74	189,74	0,000*
Erro	35	0,14	0,01		
Total	38	2,35			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos

b) Absorção de água.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	3	423,41	141,14	29,37	0,000*
Erro	33	158,60	4,81		
Total	36	582,01			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos

Comparação múltipla de médias

As tabelas abaixo apresentam os resultados da comparação múltipla de médias dos valores de massa específica aparente e absorção de água da fase “cimentícia” nos intervalos de densidade.

a) Massa específica aparente.

	1,7<d<1,9	1,9<d<2,2	2,2<d<2,5	d> 2,5
1,7<d<1,9				
1,9<d<2,2	-0,31 -0,19			
2,2<d<2,5	-0,48 -0,37	-0,23 -0,12		
d> 2,5	-0,80 -0,67	-0,55 -0,43	-0,37 -0,25	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

b) Absorção de água da fase “cimentícia” nos intervalos de densidade.

	1,7<d<1,9	1,9<d<2,2	2,2<d<2,5	d> 2,5
1,7<d<1,9				
1,9<d<2,2				
2,2<d<2,5	+6,26 +10,50	+0,67 +4,40		
d> 2,5	+7,53 +12,30	+1,92 +6,23	-0,59 +3,67	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

Fase cerâmica vermelha

Teste de normalidade

As figuras abaixo mostram que as distribuições dos valores de massa específica aparente (a) e de absorção de água (b) da fase “cerâmica vermelha” nos intervalos de densidade seguem uma distribuição normal. Foi excluído um valor de absorção de água.

(a) massa esp. aparente

(b) absorção de água

Análise de variância

As tabelas abaixo apresentam os resultados da análise de variância dos valores de massa específica aparente e absorção de água da fase “cerâmica vermelha” nos intervalos de densidade.

a) Massa específica aparente.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	2	0,45	0,23	29,77	0,000*
Erro	22	0,17	0,01		
Total	24	0,62			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos

b) Absorção de água.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	2	565,24	282,62	30,18	0,000*
Erro	21	196,62	9,36		
Total	23	761,86			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos

Comparação múltipla de médias

As tabelas abaixo apresentam os resultados da comparação múltipla de médias dos valores de massa específica aparente e absorção de água da fase “cerâmica vermelha” nos intervalos de densidade.

a) Massa específica aparente.

	1,7<d<1,9	1,9<d<2,2	2,2<d<2,5
1,7<d<1,9			
1,9<d<2,2	-0,27 -0,09		
2,2<d<2,5	-0,41 -0,24	-0,24 -0,06	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

b) Absorção de água.

	1,7<d<1,9	1,9<d<2,2	2,2<d<2,5
1,7<d<1,9			
1,9<d<2,2	+4,07 +10,48		
2,2<d<2,5	+8,27 +14,45	+0,79 +7,38	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

Fase rocha

Teste de normalidade

As figuras abaixo mostram que as distribuições dos valores de massa específica aparente (a) e de absorção de água (b) da fase “rocha” nos intervalos de densidade seguem uma distribuição normal. Foi excluído um valor espúrio de massa específica aparente bem como um de absorção de água.

(a) massa esp. aparente

(b) absorção de água

Análise de variância

As tabelas abaixo apresentam os resultados da análise de variância dos valores de massa específica aparente e absorção de água da fase “rocha” nos intervalos de densidade.

a) Massa específica aparente.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	1	0,37	0,37	34,51	0,000*
Erro	15	0,16	0,01		
Total	16	0,53			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos

b) Absorção de água.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	1	25,39	25,39	18,52	0,001*
Erro	14	19,19	1,37		
Total	15	44,59			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos

Produtos contidos nos intervalos de densidade

Teste de normalidade

As figuras abaixo mostram que os resultados das propriedades físicas dos agregados graúdos de RCD reciclados dos produtos das separações por densidade seguem uma distribuição normal. Foi excluído um valor do produto contido no intervalo “2,2<d<2,5”.

(a) massa específica real

(b) massa esp. aparente

(c) absorção de água

Análise de variância

As tabelas abaixo apresentam os resultados da análise de variância para os produtos de separações por densidade.

a) Massa específica real

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	3	0,026	0,009	5,23	0,004*
Erro	42	0,071	0,002		
Total	45	0,097			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

b) Massa específica aparente

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	3	5,98	1,99	425,37	0,000*
Erro	44	0,21	0,01		
Total	47	6,18			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

c) Absorção de água

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	3	3264,12	1088,04	172,63	0,000*
Erro	44	277,31	6,30		
Total	47	3541,43			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

Comparação múltipla das médias

As tabelas abaixo mostram os resultados da comparação múltipla das médias para os produtos de separações por densidade.

a) Massa específica real

	d>2,5	2,2<d<2,5	1,9<d<2,2	1,7<d<1,9
d>2,5		+0,02 +0,09	+0,03 +0,09	-0,01 +0,06
2,2<d<2,5			-0,02 +0,04	-0,06 +0,01
1,9<d<2,2				-0,07 +0,01
1,7<d<1,9				

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

b) Massa específica aparente

	d>2,5	2,2<d<2,5	1,9<d<2,2	1,7<d<1,9
d>2,5				
2,2<d<2,5	-0,49 -0,38			
1,9<d<2,2	-0,71 -0,60	-0,28 -0,17		
1,7<d<1,9	-1,02 -0,91	-0,59 -0,47	-0,37 -0,26	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

c) Absorção de água

	d>2,5	2,2<d<2,5	1,9<d<2,2	1,7<d<1,9
d>2,5				
2,2<d<2,5	+3,15 +7,29			
1,9<d<2,2	+6,52 +10,65	+1,30 +5,43		
1,7<d<1,9	+20,22 +24,35	+15,01 +19,13	+11,64 +15,77	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

Capítulo 5 (item 5.6) - Estimativa dos aglomerantes, dos argilominerais e das rochas

Análise de variância

As tabelas abaixo mostram os resultados da análise de variância para os teores dos grupos de materiais presentes nos produtos das separações por densidade.

a) Teores de aglomerantes.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	P
Fatores	3	517,5	172,5	3,99	0,05*
Erro	8	345,8	43,2		
Total	11	863,3			

* Existe diferença significativa entre a média dos tratamentos.

b) Teores de argilominerais.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	3	794,5	264,8	8,62	0,007*
Erro	8	245,8	30,7		
Total	11	1.040,3			

* Existe diferença significativa entre a média dos tratamentos.

Comparação múltipla das médias

As tabelas abaixo mostram os resultados da comparação múltipla das médias dos teores dos grupos de materiais presentes nos produtos das separações por densidade.

a) Teores de aglomerantes.

	1,7<d<1,9	1,9<d<2,2	2,2<d<2,5	d>2,5
1,7<d<1,9				
1,9<d<2,2	-15,11 +9,65			
2,2<d<2,5	-24,98 -0,22	-22,25 +2,51		
d>2,5	-28,11 -3,35	-25,38 -0,62	-15,51 +9,25	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

b) Teores de argilominerais.

	1,7 <d< 1,9	1,9< d< 2,2	2,2 <d< 2,5	d> 2,5
1,7< d< 1,9				
1,9< d< 2,2	-25,64 -4,76			
2,2< d< 2,5	-30,44 -9,56	-15,24 +5,64		
d>2,5	-30,07 -9,20	-14,87 +6,00	-10,07 +10,80	

Os resultados que apresentaram diferença estatística significativa estão em negrito.

Capítulo 6 (item 6.4.1) - Porosidade e absorção de água

Teste de normalidade

As figuras abaixo mostram que os valores de absorção de água dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados em função das relações a/c seguem uma distribuição normal.

(a) $a/c=0,4$

(b) $a/c=0,5$

(c) $a/c=0,67$

Análise de variância

As tabelas abaixo apresentam os resultados de análise de variância dos valores de absorção de água dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados em função das relações a/c .

a) Relação $a/c=0,4$.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	7	100,90	14,41	447,15	0,000*
Erro	8	0,26	0,03		
Total	15	101,16			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

b) Relação $a/c=0,5$.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	6	74,84	12,47	225,22	0,000*
Erro	7	0,39	0,05		
Total	13	75,23			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

c) Relação $a/c=0,67$.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	6	79,97	13,33	641,20	0,000*
Erro	7	0,14	0,02		
Total	13	80,11			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

Comparação múltipla das médias

As tabelas abaixo mostram os resultados da comparação múltipla das médias dos valores de absorção de água dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados em função das relações a/c.

a) Relação a/c=0,4.

	C 1,9	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
C 1,9								
V 1,9	-0,18 +0,65							
C 1,9-2,2	-2,70 -1,88	-2,94 -2,11						
V 1,9-2,2	-2,21 -1,38	-2,44 -1,62	+0,08 +0,91					
C 2,2-2,5	-6,18 -5,35	-6,41 -5,59	-3,89 -3,06	-4,38 -3,56				
V 2,2-2,5	-5,19 -4,36	-5,42 -4,60	-2,90 -2,07	-3,39 -2,57	+0,58 +1,40			
C 2,5	-6,60 -5,77	-6,83 -6,00	-4,31 -3,48	-4,80 -3,98	-0,83 -0,01	-1,82 -1,00		
V 2,5	-6,40 -5,57	-6,63 -5,81	-4,11 -3,28	-4,60 -3,78	-0,63 +0,19	-1,62 -0,80	-0,21 +0,61	

b) Relação a/c=0,5.

	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
V 1,9							
C 1,9-2,2	-4,03 -2,91						
V 1,9-2,2	-3,17 -2,06	+0,29 +1,41					
C 2,2-2,5	-6,50 -5,39	-3,03 -1,92	-3,88 -2,77				
V 2,2-2,5	-6,43 -5,32	-2,96 -1,85	-3,81 -2,70	-0,49 +0,62			
C 2,5	-7,22 -6,10	-3,75 -2,63	-4,60 -3,48	-1,27 -0,16	-1,34 -0,23		
V 2,5	-7,05 -5,93	-3,58 -2,46	-4,42 -3,31	-1,10 +0,01	-1,17 -0,06	-0,39 +0,73	

c) Relação a/c=0,67.

	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
V 1,9							
C 1,9-2,2	-3,67 -2,98						
V 1,9-2,2	-3,14 -2,46	+0,18 +0,86					
C 2,2-2,5	-6,57 -5,89	-3,25 -2,57	-3,77 -3,09				
V 2,2-2,5	-6,14 -5,46	-2,82 -2,14	-3,34 -2,66	+0,09 +0,77			
C 2,5	-7,02 -6,34	-3,70 -3,02	-4,22 -3,54	-0,79 -0,11	-1,22 -0,54		
V 2,5	-7,29 -6,61	-3,97 -3,29	-4,50 -3,81	-1,06 -0,38	-1,50 -0,81	-0,62 +0,07	

Capítulo 6 (item 6.4.2) – Resistência à compressão

Teste de normalidade

As figuras abaixo mostram que os valores de resistência a compressão dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados em função das relações a/c seguem uma distribuição normal.

(a) a/c=0,4

(b) a/c=0,5

(c) a/c=0,67

Análise de variância

As tabelas abaixo apresentam os resultados de análise de variância dos valores de resistência a compressão dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados em função das relações a/c.

a) Relação a/c=0,4.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	7	1091,1	155,87	158,03	0,000*
Erro	16	15,78	0,99		
Total	23	1106,90			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

b) Relação a/c=0,5.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	6	211,28	35,21	43,39	0,000*
Erro	14	11,36	0,81		
Total	20	222,65			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

c) Relação a/c=0,67.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	6	97,40	16,23	70,87	0,000*
Erro	14	3,21	0,23		
Total	20	100,61			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

Comparação múltipla das médias

a) Relação a/c=0,4.

	C 1,9	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
C 1,9								
V 1,9	-2,52 +0,92							
C 1,9-2,2	+2,09 +5,53	+2,89 +6,33						
V 1,9-2,2	+1,46 +4,90	+2,26 +5,70	-2,35 +1,09					
C 2,2-2,5	+12,40 +15,84	+13,20 +16,64	+8,59 +12,53	+9,22 +12,66				
V 2,2-2,5	+13,16 +16,60	+13,96 +17,40	+9,35 +12,79	+9,98 +13,42	-0,96 +2,48			
C 2,5	+14,36 +17,80	+15,16 +18,60	+10,55 +13,99	+11,17 +14,61	+0,23 +3,67	-0,52 +2,92		
V 2,5	+11,90 +15,34	+12,70 +16,14	+8,09 +11,53	+8,71 +12,15	-2,23 +1,21	-2,98 +0,46	-4,18 -0,74	

b) Relação $a/c=0,5$.

	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
V 1,9							
C 1,9-2,2	+3,43 +6,58						
V 1,9-2,2	+0,16 +3,31	-4,85 -1,70					
C 2,2-2,5	+4,07 +7,22	-0,94 +2,22	+2,34 +5,49				
V 2,2-2,5	+3,81 +6,96	-1,20 +1,96	+2,08 +5,23	-1,84 +1,32			
C 2,5	+7,98 +11,14	+2,98 +6,13	+6,25 +9,40	+2,34 +5,49	+2,60 +5,75		
V 2,5	+7,10 +10,26	+2,10 +5,25	+5,37 +8,52	+1,46 +4,61	+1,72 +4,87	-2,46 +0,70	

c) Relação $a/c=0,67$.

	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
V 1,9							
C 1,9-2,2	-0,28 +1,39						
V 1,9-2,2	-1,52 +0,15	-2,08 -0,40					
C 2,2-2,5	+3,05 +4,72	+2,49 +4,17	+3,73 +5,41				
V 2,2-2,5	+2,66 +4,33	+2,10 +3,78	+3,34 +5,02	-1,23 +0,45			
C 2,5	+4,50 +6,17	+3,94 +5,62	+5,18 +6,86	+0,61 +2,29	+1,00 +2,68		
V 2,5	+2,89 +4,57	+2,34 +4,01	+3,58 +5,23	-0,99 +0,68	-0,60 +1,07	-2,44 -0,76	

Capítulo 6 (item 6.4.3) – Módulo de elasticidade

Teste de normalidade

As figuras abaixo mostram que os valores de módulo de elasticidade dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados em função das relações a/c seguem uma distribuição normal.

(a) $a/c=0,4$

(b) $a/c=0,5$

(c) $a/c=0,67$

Análise de variância

As tabelas abaixo apresentam os resultados de análise de variância dos valores de módulo de elasticidade dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados em função das relações a/c .

a) Relação $a/c=0,4$.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	7	1041,03	148,72	309,30	0,000*
Erro	14	6,73	0,48		
Total	21	1047,77			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

b) Relação $a/c=0,5$.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	6	597,92	99,65	191,20	0,000*
Erro	14	7,30	0,52		
Total	20	605,21			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

c) Relação $a/c=0,67$.

Tratamento	GL	SQ	MQ	F	p
Fatores	6	579,69	96,62	342,08	0,000*
Erro	11	3,11	0,28		
Total	17	582,80			

* Existe diferença estatística significativa entre a média dos tratamentos.

Comparação múltipla de médias

As tabelas abaixo mostram os resultados da comparação múltipla das médias dos valores de módulo de elasticidade dos concretos produzidos com os agregados graúdos de RCD reciclados em função das relações a/c.

a) Relação a/c=0,4.

	C 1,9	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
C 1,9								
V 1,9	-1,96 +0,75							
C 1,9-2,2	+4,04 +6,47	+4,50 +7,22						
V 1,9-2,2	+1,05 +3,48	+1,52 +4,23	-4,21 -1,77					
C 2,2-2,5	+11,67 +14,38	+12,15 +15,12	+6,42 +9,13	+9,40 +12,12				
V 2,2-2,5	+15,22 +17,64	+15,68 +18,40	+9,96 +12,39	+12,95 +15,38	+2,05 +4,76			
C 2,5	+13,31 +15,73	+13,77 +16,49	+8,05 +10,48	+11,04 +13,47	+0,14 +2,85	-3,12 -0,70		
V 2,5	+14,86 +17,28	+15,32 +18,04	+9,60 +12,03	+12,59 +15,02	+1,69 +4,40	-1,57 +0,85	+0,34 +2,76	

b) Relação a/c=0,5.

	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
V 1,9							
C 1,9-2,2	+4,40 +6,93						
V 1,9-2,2	+2,11 +4,63	-3,56 -1,03					
C 2,2-2,5	+12,40 +14,92	+6,73 +9,26	+9,03 +11,55				
V 2,2-2,5	+9,60 +12,12	+3,93 +6,45	+6,22 +8,75	-4,07 -1,54			
C 2,5	+12,77 +15,30	+7,11 +9,64	+9,40 +11,93	-0,89 +1,64	+1,92 +4,45		
V 2,5	+12,76 +15,29	+7,10 +9,62	+9,39 +11,92	-0,90 +1,63	+1,91 +4,43	-1,28 +1,25	

c) Relação a/c=0,67.

	V 1,9	C 1,9-2,2	V 1,9-2,2	C 2,2-2,5	V 2,2-2,5	C 2,5	V 2,5
V 1,9							
C 1,9-2,2	+2,60 +4,73						
V 1,9-2,2	+0,10 +2,01	-3,67 -1,54					
C 2,2-2,5	+8,81 +10,94	+5,04 +7,38	+7,75 +9,88				
V 2,2-2,5	+7,91 +10,04	+4,14 +6,48	+6,85 +8,98	-2,07 +0,27			
C 2,5	+12,05 +13,96	+8,27 +10,41	+10,99 +12,90	+2,06 +4,20	+2,96 +5,10		
V 2,5	+13,65 +15,56	+9,87 +12,00	+12,59 +14,50	+3,66 +5,79	+4,56 +6,69	+0,64 +2,55	

Apêndice E – Porosidade teórica dos concretos segundo uma simplificação do modelo de Powers

CONSUMO DE CIMENTO=300 KG/M³									
Natural - F1									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,68								
Água	1,00								
Traco - fresco									
Cimento	2,70	0,90	12,7%	v/v					
Areia	7,16	2,71	33,6%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,63	3,60	45,2%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	8,5%	20,0%					
Total	21,29	9,81	100,0%	100,0%					
Traco - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	12,7%	v/v					
Água combinada	0,59	0,59	2,8%	6,6%					
Água evaporável (pasta)	1,21	1,21	5,7%	13,4%					
Areia	7,16	2,71	33,6%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,63	3,60	45,2%	40,0%					
Água evaporável (agr.)	0,00	0,00	0,0%	0,0%					
Total	21,29	9,81	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	100,0%								
Volume de poros	13,4%								
C d<1,9 - F2									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	1,78								
Água	1,00								
Traco - fresco									
Cimento	2,70	0,90	14,9%	10,0%					
Areia	7,16	2,71	39,6%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	6,41	3,60	35,5%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	10,0%	20,0%					
Total	18,07	8,01	100,0%	100,0%					
Traco - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	14,9%	v/v					
Água combinada	0,59	0,59	3,3%	8,3%					
Água evaporável (pasta)	1,21	1,21	6,7%	16,6%					
Areia	7,16	2,71	39,6%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	6,41	3,60	35,5%	40,0%					
Água evaporável (agr.)	0,00	0,00	0,0%	0,0%					
Total	18,07	8,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	84,8%								
Volume de poros	15,2%								
C d<1,9 - F11									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	1,78								
Água	1,00								
Traco - fresco									
Cimento	3,60	1,20	19,8%	13,3%					
Areia	6,36	2,40	35,0%	26,7%					
Agregado graúdo reciclado	6,41	3,60	35,3%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	9,9%	20,0%					
Total	18,17	8,01	100,0%	100,0%					
Traco - endurecido									
Cimento	3,60	1,20	19,8%	v/v					
Água combinada	0,79	0,79	4,4%	8,8%					
Água evaporável (pasta)	1,01	1,01	4,7%	11,2%					
Areia	6,36	2,40	35,3%	40,0%					
Agregado graúdo reciclado	6,41	3,60	35,3%	40,0%					
Água evaporável (agr.)	0,00	0,00	0,0%	0,0%					
Total	18,17	8,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	84,8%								
Volume de poros	15,2%								
C d<1,9 - F20									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	1,78								
Água	1,00								
Traco - fresco									
Cimento	4,50	1,50	24,6%	16,7%					
Areia	5,57	2,11	30,5%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	6,41	3,60	35,1%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	9,8%	20,0%					
Total	18,28	8,01	100,0%	100,0%					
Traco - endurecido									
Cimento	4,50	1,50	24,6%	v/v					
Água combinada	0,99	0,99	5,4%	11,0%					
Água evaporável (pasta)	0,81	0,81	4,4%	9,0%					
Areia	5,57	2,11	30,5%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	6,41	3,60	35,1%	40,0%					
Água evaporável (agr.)	0,00	0,00	0,0%	0,0%					
Total	18,28	8,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	84,8%								
Volume de poros	15,2%								
C d<1,9 - F27									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	1,78								
Água	1,00								
Traco - fresco									
Cimento	4,50	1,50	24,6%	16,7%					
Areia	5,57	2,11	30,5%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	6,41	3,60	35,1%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	9,8%	20,0%					
Total	18,28	8,01	100,0%	100,0%					
Traco - endurecido									
Cimento	4,50	1,50	24,6%	v/v					
Água combinada	0,99	0,99	5,4%	11,0%					
Água evaporável (pasta)	0,81	0,81	4,4%	9,0%					
Areia	5,57	2,11	30,5%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	6,41	3,60	35,1%	40,0%					
Água evaporável (agr.)	0,00	0,00	0,0%	0,0%					
Total	18,28	8,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	84,8%								
Volume de poros	15,2%								

CONSUMO DE CIMENTO=300 KG/M³										CONSUMO DE CIMENTO=400 KG/M³										CONSUMO DE CIMENTO=500 KG/M³									
C 1,9-d<2,2 - T4										C 1,9-d<2,2 - T13										C 1,9-d<2,2 - T22									
Massa específica kg/dm³										Massa específica kg/dm³										Massa específica kg/dm³									
Cimento	3,00									Cimento	3,00									Cimento	3,00								
Areia	2,65									Areia	2,65									Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,11									Agregado graúdo reciclado	2,11									Agregado graúdo reciclado	2,11								
Água	1,00									Água	1,00									Água	1,00								
Traço - fresco										Traço - fresco										Traço - fresco									
Cimento	2,70	0,90	15,1%	10,0%						Cimento	3,60	1,20	20,0%	13,3%						Cimento	4,50	1,50	24,8%	16,7%					
Areia	7,16	2,71	40,0%	30,1%						Areia	6,36	2,40	35,3%	26,7%						Areia	5,57	2,11	30,7%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	7,60	3,60	42,4%	40,0%						Agregado graúdo reciclado	7,60	3,60	42,2%	40,0%						Agregado graúdo reciclado	7,60	3,60	41,9%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	10,0%	20,0%						Água do cimento	1,80	1,80	10,0%	20,0%						Água do cimento	1,80	1,80	9,9%	20,0%					
Total	19,26	9,01	107,5%	100,0%						Total	19,36	9,01	107,4%	100,0%						Total	19,47	9,01	107,4%	100,0%					
Traço - endurecido										Traço - endurecido										Traço - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	14,0%	10,0%						Cimento	3,60	1,20	16,6%	13,3%						Cimento	4,50	1,50	23,1%	16,7%					
Água combinada	0,59	0,59	3,1%	6,6%						Água combinada	0,79	0,79	4,1%	8,8%						Água combinada	0,99	0,99	5,1%	11,0%					
Água evaporável (pasta)	1,21	1,21	6,3%	13,4%						Água evaporável (pasta)	1,01	1,01	5,2%	11,2%						Água evaporável (pasta)	0,81	0,81	4,2%	9,0%					
Areia	7,16	2,71	37,2%	30,0%						Areia	6,36	2,40	32,9%	26,7%						Areia	5,57	2,11	28,6%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	7,60	3,60	39,5%	31,4%						Agregado graúdo reciclado	7,60	3,60	39,3%	31,4%						Agregado graúdo reciclado	7,60	3,60	39,0%	31,4%					
Água evaporável (agr.)				8,6%						Água evaporável (agr.)				8,6%						Água evaporável (agr.)				8,6%					
Total	19,26	9,01	100,0%	100,0%						Total	19,36	9,01	100,0%	100,0%						Total	19,47	9,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	91,4%									Volume de sólidos	91,4%									Volume de sólidos	91,4%								
Volume de poros	22,0%									Volume de poros	19,8%									Volume de poros	17,6%								
V 1,9-d<2,2 - T6										V 1,9-d<2,2 - T14										V 1,9-d<2,2 - T23									
Massa específica kg/dm³										Massa específica kg/dm³										Massa específica kg/dm³									
Cimento	3,00									Cimento	3,00									Cimento	3,00								
Areia	2,65									Areia	2,65									Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,02									Agregado graúdo reciclado	2,02									Agregado graúdo reciclado	2,02								
Água	1,00									Água	1,00									Água	1,00								
Traço - fresco										Traço - fresco										Traço - fresco									
Cimento	2,70	0,90	14,3%	10,0%						Cimento	3,60	1,20	18,9%	13,3%						Cimento	4,50	1,50	23,5%	16,7%					
Areia	7,16	2,71	37,8%	30,1%						Areia	6,36	2,40	33,4%	26,7%						Areia	5,57	2,11	29,1%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	7,27	3,60	38,4%	40,0%						Agregado graúdo reciclado	7,27	3,60	38,2%	40,0%						Agregado graúdo reciclado	7,27	3,60	38,0%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	9,5%	20,0%						Água do cimento	1,80	1,80	9,5%	20,0%						Água do cimento	1,80	1,80	9,4%	20,0%					
Total	19,93	9,01	106,6%	100,0%						Total	19,63	9,01	106,6%	100,0%						Total	19,94	9,01	106,6%	100,0%					
Traço - endurecido										Traço - endurecido										Traço - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	14,3%	10,0%						Cimento	3,60	1,20	18,9%	13,3%						Cimento	4,50	1,50	23,5%	16,7%					
Água combinada	0,59	0,59	3,1%	6,6%						Água combinada	0,79	0,79	4,1%	8,8%						Água combinada	0,99	0,99	5,0%	11,0%					
Água evaporável (pasta)	1,21	1,21	6,3%	13,4%						Água evaporável (pasta)	1,01	1,01	5,2%	11,2%						Água evaporável (pasta)	0,81	0,81	4,0%	9,0%					
Areia	7,16	2,71	37,8%	30,1%						Areia	6,36	2,40	33,4%	26,7%						Areia	5,57	2,11	28,1%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	7,27	3,60	38,4%	40,0%						Agregado graúdo reciclado	7,27	3,60	38,3%	40,0%						Agregado graúdo reciclado	7,27	3,60	38,2%	40,0%					
Água evaporável (agr.)				8,6%						Água evaporável (agr.)				8,6%						Água evaporável (agr.)				8,6%					
Total	19,93	9,01	106,6%	100,0%						Total	19,63	9,01	106,6%	100,0%						Total	19,94	9,01	106,6%	100,0%					
Volume de sólidos	90,4%									Volume de sólidos	90,4%									Volume de sólidos	90,4%								
Volume de poros	22,8%									Volume de poros	25,0%									Volume de poros	26,0%								
C 2,5-d<2,5 - T8										C 2,5-d<2,5 - T16										C 2,5-d<2,5 - T26									
Massa específica kg/dm³										Massa específica kg/dm³										Massa específica kg/dm³									
Cimento	3,00									Cimento	3,00									Cimento	3,00								
Areia	2,65									Areia	2,65									Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,03									Agregado graúdo reciclado	2,03									Agregado graúdo reciclado	2,03								
Água	1,00									Água	1,00									Água	1,00								
Traço - fresco										Traço - fresco										Traço - fresco									
Cimento	2,70	0,90	13,5%	10,0%						Cimento	3,60	1,20	17,0%	13,3%						Cimento	4,50	1,50	21,4%	16,7%					
Areia	7,16	2,71	34,5%	30,1%						Areia	6,36	2,40	32,0%	26,7%						Areia	5,57	2,11	29,0%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	7,21	3,60	35,2%	40,0%						Agregado graúdo reciclado	7,21	3,60	31,7%	40,0%						Agregado graúdo reciclado	7,21	3,60	30,1%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	8,5%	20,0%						Água do cimento	1,80	1,80	8,4%	20,0%						Água do cimento	1,80	1,80	8,3%	20,0%					
Total	19,77	9,01	105,2%	100,0%						Total	19,63	9,01	104,9%	100,0%						Total	19,68	9,01	104,9%	100,0%					
Traço - endurecido										Traço - endurecido										Traço - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	13,5%	10,0%						Cimento	3,60	1,20	17,0%	13,3%						Cimento	4,50	1,50	21,4%	16,7%					
Água combinada	0,59	0,59	3,0%	6,6%						Água combinada	0,79	0,79	4,0%	8,8%						Água combinada	0,99	0,99	4,7%	11,0%					
Água evaporável (pasta)	1,21	1,21	6,2%	13,4%						Água evaporável (pasta)	1,01	1,01	4,9%	11,2%						Água evaporável (pasta)	0,81	0,81	4,0%	9,0%					
Areia	7,16	2,71	34,5%	30,0%						Areia	6,36	2,40	32,0%	26,7%						Areia	5,57	2,11	28,9%	23,4%					
Agregado graúdo reciclado	7,13	3,60	34,9%	39,9%						Agregado graúdo reciclado	7,13	3,60	31,6%	39,9%						Agregado graúdo reciclado	7,13	3,60	30,0%	39,9%					
Água evaporável (agr.)				8,5%						Água evaporável (agr.)				8,5%						Água evaporável (agr.)				8,5%					
Total	20,77	9,01	105,6%	100,0%						Total	20,29	9,01	105,0%	100,0%						Total	20,96	9,01	105,0%	100,0%					
Volume de sólidos	91,9%									Volume de sólidos	91,9%									Volume de sólidos	91,9%								
Volume de poros	16,2%									Volume de poros	13,6%									Volume de poros	11,2%								

CONSUMO DE CIMENTO=300 KG/M³									
V 2,2x4x2,5 - T7									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,49								
Água	1,00								
Traço - fresco									
Cimento	2,70	Volume (dm³)	0,90	m/m	v/v				
Areia	7,16	2,71	34,7%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	8,96	3,60	43,5%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	8,7%	20,0%					
Total	20,62	9,01	100,0%	100,0%					
Traço - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	13,1%	10,0%					
Areia	1,21	1,21	5,8%	13,4%					
Água evaporável (pasta)	7,16	2,71	34,7%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	8,96	3,60	43,5%	37,0%					
Água evaporável (agr.)				3,0%					
Total	20,62	9,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	97,0%								
Volume de poros	16,4%								
C 20-2,5 - T8									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,60								
Água	1,00								
Traço - fresco									
Cimento	2,70	0,90	12,8%	10,0%					
Areia	7,16	2,71	34,1%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,36	3,60	44,5%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	8,6%	20,0%					
Total	21,02	9,01	100,0%	100,0%					
Traço - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	10,9%	10,0%					
Areia	1,21	1,21	5,7%	13,4%					
Água evaporável (pasta)	7,16	2,71	34,1%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,36	3,60	44,5%	38,4%					
Água evaporável (agr.)				3,0%					
Total	21,02	9,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	96,0%								
Volume de poros	15,0%								
V 2,2x4x2,5 - T7									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,49								
Água	1,00								
Traço - fresco									
Cimento	2,70	0,90	12,8%	10,0%					
Areia	7,16	2,71	34,1%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,36	3,60	44,5%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	8,6%	20,0%					
Total	21,02	9,01	100,0%	100,0%					
Traço - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	10,9%	10,0%					
Areia	1,21	1,21	5,7%	13,4%					
Água evaporável (pasta)	7,16	2,71	34,1%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,36	3,60	44,5%	38,4%					
Água evaporável (agr.)				3,0%					
Total	21,02	9,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	96,0%								
Volume de poros	15,0%								
V 2,2x4x2,5 - T7									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,49								
Água	1,00								
Traço - fresco									
Cimento	2,70	0,90	12,8%	10,0%					
Areia	7,16	2,71	34,1%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,36	3,60	44,5%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	8,6%	20,0%					
Total	21,02	9,01	100,0%	100,0%					
Traço - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	10,9%	10,0%					
Areia	1,21	1,21	5,7%	13,4%					
Água evaporável (pasta)	7,16	2,71	34,1%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,36	3,60	44,5%	38,4%					
Água evaporável (agr.)				3,0%					
Total	21,02	9,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	96,0%								
Volume de poros	15,0%								
V 2,2x4x2,5 - T7									
Massa específica	kg/dm³								
Cimento	3,00								
Areia	2,65								
Agregado graúdo reciclado	2,49								
Água	1,00								
Traço - fresco									
Cimento	2,70	0,90	12,8%	10,0%					
Areia	7,16	2,71	34,1%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,36	3,60	44,5%	40,0%					
Água do cimento	1,80	1,80	8,6%	20,0%					
Total	21,02	9,01	100,0%	100,0%					
Traço - endurecido									
Cimento	2,70	0,90	10,9%	10,0%					
Areia	1,21	1,21	5,7%	13,4%					
Água evaporável (pasta)	7,16	2,71	34,1%	30,1%					
Agregado graúdo reciclado	9,36	3,60	44,5%	38,4%					
Água evaporável (agr.)				3,0%					
Total	21,02	9,01	100,0%	100,0%					
Volume de sólidos	96,0%								
Volume de poros	15,0%								