

Vanderley M. John é engenheiro civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS (1982). Mestre em Engenharia Civil (1987) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. É doutor em Engenharia (1995) e livre-docente (2000) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Fez pós-doutorado no Royal Institute of Technology na Suécia (2000-2001). É professor associado do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP. Diretor do CB 02 da ABNT desde 1995, representa esta organização no conselho técnico do PBQP-H. Participou diversas vezes da diretoria executiva da ANTAC, tendo sido seu presidente entre 1993 e 1995. Foi pesquisador do IPT no período de 1988 a 1995 e professor da UNISINOS (1986-1988). Atua nas áreas de Ciência de Materiais para Construção e Infra-estrutura, com ênfase em Reciclagem de Resíduos e Aspectos Ambientais.

E-mail: john@poli.usp.br

Sérgio Cirelli Angulo é engenheiro civil pela Universidade de Londrina (1998). Obteve título de Mestre (2000) e Doutor (2005) em Engenharia de Construção Civil e Urbana pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Foi Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina em 2001. Ministrou palestras em instituições como Petrobrás, Universidade Estadual de Campinas, Associação Brasileira de Limpeza Pública, Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo. Atualmente, é pós-doutorando em Engenharia de Minas e de Petróleo na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, atuando na área de Reciclagem de Resíduos para a Construção.

E-mail: sergio.angulo@poli.usp.br

Henrique Kahn é geólogo (1977) pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - USP. Mestre em Mineralogia e Petrologia pelo Instituto de Geociências da USP (1988). Doutor (1991) em Engenharia Mineral pelo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP. Professor (livre-docente) de graduação e pós-graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP atuando na área de caracterização tecnológica de matérias-primas minerais. Atualmente é coordenador do Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP e presidente do International Council for Applied Mineralogy (ICAM).

E-mail: henrique.kahn@poli.usp.br

6.

Controle da qualidade dos agregados de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos a partir de uma ferramenta de caracterização

Vanderley M. John, Sérgio C. Angulo e Henrique Kahn

1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar um método de controle de qualidade para emprego dos agregados graúdos reciclados, provenientes da fração mineral dos resíduos de construção e demolição (RCD) em concretos, a partir de uma ferramenta de caracterização.

Ele é resultado de um projeto que teve por objetivo o aperfeiçoamento da normalização para emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos, convênio nº 23.01.0673.00. Esse projeto foi financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep, Programa Habitaré) e executado pelo Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com a participação do Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo (Sinduscon-SP). Ele ainda contou com recursos complementares de instituições como o Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp).

O projeto foi composto de equipe multidisciplinar, envolvendo especialistas de áreas como Construção Civil (especialidade em Materiais de Construção), Mineralogia, Tratamento de Minérios e Química, além de dois estagiários, três alunas de Iniciação Científica, duas alunas de Mestrado e um aluno de Doutorado.

Foram produzidas, nesse período, uma monografia de conclusão de curso, duas dissertações de Mestrado e uma tese de Doutorado, incluindo um capítulo de livro, um artigo em revista científica nacional, três artigos de periódicos de difusão tecnológica (um deles internacional), 15 artigos de congressos (nacionais e internacionais) e quatro resumos de Iniciação Científica. Ainda nesse período, a equipe colaborou intensamente na elaboração das normas técnicas de uso de agregados de RCD reciclados, particularmente em concretos sem função estrutural, NBR 15116, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), publicada oficialmente no ano de 2004.

Uma contextualização do tema é apresentada no item 2, para destacar a importância da reciclagem intensiva da fração mineral do RCD, a fim de minimizar os impactos ambientais e econômicos desse resíduo em cidades, assim como as potencialidades do emprego de agregados de RCD reciclados nos setores de argamassas e concretos. O item 3 discute as dificuldades do emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos, em razão da: a) pouca eficiência na triagem da fração mineral do RCD; b) variabilidade intrínseca desses agregados; c) insuficiência dos métodos de controle de qualidade; e d) necessidade de controle no processamento do RCD mineral. No item 4, apresenta-se o método de controle de qualidade dos agregados de RCD reciclados para emprego em concretos, considerando os seguintes itens: a) obtenção de amostras médias representativas, por método de homogeneização; b) método de separação por densidade e influência nas características e propriedades físicas desses agregados; e c) parâmetros de controle de qualidade desses agregados, para emprego em concretos.

2 Contextualização

2.1 Gerenciamento dos resíduos de construção e demolição

Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam de 13% a 67%, em massa, dos resíduos sólidos urbanos, tanto no Brasil como no exterior; e cerca

de duas a três vezes a massa de resíduos domiciliares (JOHN, 2000). No Brasil, considerando-se um índice médio de geração *per capita* de 500 kg/habitante por ano, estima-se uma geração na ordem de 68,5 milhões de toneladas/ano para uma população urbana de 137 milhões de pessoas, segundo censo do IBGE¹ de 2002 (ANGULO et al., 2002).

As experiências nacionais e internacionais indicam que, quando ignorados pelas administrações públicas, os RCD acabam sendo depositados ilegalmente na malha urbana (EC, 2000) e são responsáveis pela degradação urbana, pelo assoreamento de córregos e rios, pelo entupimento de galerias e bueiros, degradação de áreas urbanas e proliferação de escorpiões, aranhas e roedores que afetam a saúde pública (PINTO, 1999). Na cidade de São Paulo, por exemplo, mais de 20% dos RCD são depositados ilegalmente dentro da cidade e em cidades vizinhas, o que gera para o município uma despesa anual de R\$ 45 milhões/ano para coleta, transporte e deposição correta desse resíduo (SCHNEIDER, 2003). O ciclo “deposição ilegal privada e limpeza pelo órgão público” é repetido indefinidamente (Figura 1). O RCD, dada a sua elevada massa, também contribui para o esgotamento dos aterros em cidades de médio e grande portes (SYMONDS, 1999; EC, 2000).



(a)

(b)

Figura 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 depois de dois meses.

¹ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – <http://www.ibge.gov.br>.

Muitos países, e até cidades brasileiras, como Belo Horizonte, investem num sistema formal de gestão dos resíduos urbanos, que inclui mecanismos específicos para os RCD. A literatura apresenta a experiência de países como a Holanda (HENDRIKS, 2000), Reino Unido (HOBBS; HURLEY, 2001), Brasil (PINTO, 1999) e outros. Esse sistema geralmente contempla os seguintes pontos (JOHN et al., 2004): a) incentivo à deposição regular dos resíduos, através de uma rede de pontos de coleta desses resíduos, que evita as deposições irregulares, pois reduz os custos de transporte, combinada com regulamentação e fiscalização da atividade de transporte; b) promoção da segregação na fonte dos diferentes materiais presentes no RCD, reduzindo a contaminação e o volume dos aterros de inertes e facilitando a reciclagem; e c) estímulo da reciclagem por meio de proibição ou imposição de impostos para a deposição do RCD em aterros, e por meio do estabelecimento de marco legislativo e de normas técnicas que permitam as utilizações dos materiais reciclados, particularmente da fração mineral do RCD.

No Brasil, essa visão foi parcialmente adotada pelas Resoluções nº 307/2002 e nº 348/2004, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). A Resolução nº 307 atribui responsabilidades aos geradores, transportadores e gestores municipais. Aos municípios cabe a definição de uma política municipal para RCD, incluindo sistemas de pontos de coleta. Dos construtores, exige a definição de planos de gestão de resíduos para cada empreendimento. Ela estabelece que o RCD deve ser selecionado em quatro diferentes classes, sendo as classes A e B recicláveis. A classe A, objeto do presente estudo, é a de origem mineral (rochas, solos, cerâmicas, concretos, argamassas, etc.), que deve ser reciclada como agregados para construção civil ou destinada a aterros específicos, onde possa ser, inclusive, minerada futuramente. A classe B é composta de plásticos, papel, metais, vidros, madeiras, asfaltos e outros. A classe C é composta dos resíduos do gesso, e a D composta dos resíduos perigosos.

Os benefícios da reciclagem são (JOHN, 2000; EC, 2000): a) redução da utilização de aterros; (b) menor ocorrência de deposições irregulares; (c) redução no consumo de recursos naturais não-renováveis; e (d) redução dos impactos ambientais

das atividades de mineração. Esses benefícios só poderão ser atingidos por meio da reciclagem intensiva (ANGULO et al., 2002).

2.2 Reciclagem e mercados potenciais do RCD

Os resíduos classe B, plásticos, papéis e metais, já possuem mercados de reciclagem consolidados em boa parte das grandes cidades brasileiras. A inserção de toda e qualquer madeira nessa categoria talvez deva ser revista, uma vez que o principal mercado dessa fração hoje é a queima, que pode ser ambientalmente problemática para produtos contendo colas, tintas e biocidas. A reciclagem dessas frações, embora importante, está fora do escopo deste trabalho, assim como as frações C e D.

A fração de origem mineral, que inclui o resíduo classe A mais o gesso, representa em torno de 90% da massa do RCD no Brasil (BRITO, 1998; CARNEIRO et al., 2000), na Europa (EC, 2000; HENDRIKS, 2000) e em alguns países asiáticos (HUANG et al., 2002). A Figura 2 mostra uma usina de reciclagem dessa fração típica no Brasil e seu produto principal, o agregado reciclado, que é destinado para usos como correção de relevos, concretos magros de fundações, base de pavimentação, entre outros. Essa realidade é observada até mesmo em países mais desenvolvidos (COLLINS, 1997; ANCIA et al., 1999; HENDRIKS, 2000; MULLER, 2003).



(a)

(b)

Figura 2 – Usina de reciclagem da fração mineral do RCD de Vinhedo, estado de São Paulo (a) e detalhe do agregado de RCD empregado nas atividades de pavimentação (b)

No Brasil, existiam, em 2002, 11 usinas de reciclagem municipais (LEVY, 2002). Esse número cresceu e hoje existem até mesmo algumas privadas. As escalas de produção das usinas nacionais são pequenas, tipicamente menos que 100 toneladas de RCD processado/dia (ANGULO, 2005). Assim, a reciclagem do RCD é ainda quase insignificante diante do montante gerado. Já na União Européia existem países com índices de reciclagem entre 50% e 90%, como a Holanda, Dinamarca e Alemanha, assim como países com índices menores que 50%, como Portugal e Espanha (EC, 2000).

Uma discussão sobre os diferentes mercados de agregados potencialmente interessantes para a reciclagem da fração mineral de classe A do RCD é apresentada em Angulo et al. (2002, 2003), a partir de dados disponíveis na bibliografia, como Kulaif (2001), Whitaker (2001) e Tanno e Mota (2000), entre outros. A Figura 3 mostra o consumo brasileiro de alguns materiais de construção de origem mineral, com destaque para o mercado de agregados naturais, dividido por setor. A massa total de agregados consumida anualmente é estimada em aproximadamente 380 milhões de toneladas. A geração de RCD classe A é estimada em 61,6 milhões de toneladas por ano².

O setor público é o grande consumidor de agregados para pavimentação, com um consumo de cerca de 50 milhões de toneladas por ano. Nesse total se incluem os agregados utilizados para pré-moldados de concreto, utilizados na infra-estrutura urbana. Esse setor, no entanto, não pode consumir toda a produção potencial de agregados de RCD reciclados, tanto no Brasil quanto na Europa, onde se estima que a pavimentação é capaz de absorver em torno de 50% da massa total do RCD (COLLINS, 1997; BREUER et al., 1997; HENDRIKS, 2000).

O restante, cerca de 330 milhões de toneladas de agregados, é consumido pelo setor privado, sendo majoritariamente empregado em concretos e argamassas. Se todo o RCD classe A for reciclado como agregados e destinado a esse mercado, apenas 20% dos agregados naturais serão substituídos por reciclados.

² A fração mineral do RCD corresponde a 90% da massa total do resíduo, que é estimada em 68,5 milhões de toneladas/ano.

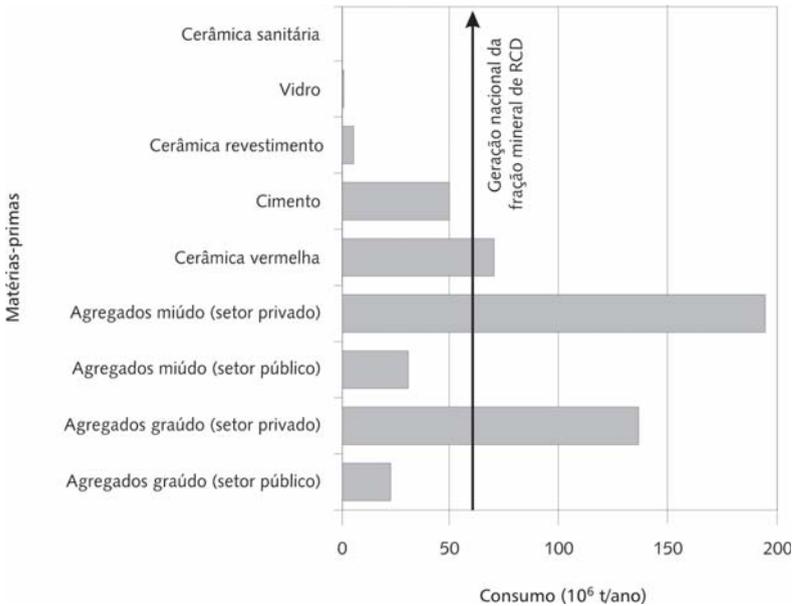


Figura 3 – Consumo brasileiro de agregados por setor e de matérias-primas para a indústria do cimento e cerâmica. A seta vertical indica a estimativa de geração de RCD no Brasil (a partir de dados de KULAIF, 2001; WHITAKER, 2001; TANNO; MOTA, 2000)

3 Dificuldades no emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos

Apesar da existência de normas técnicas na Dinamarca, Holanda (HENDRIKS, 2000; HENDRIKS; JANSSEN, 2001), Alemanha (DIN, 2002), Inglaterra (REID, 2003) e no Brasil (ABNT, 2004) que regulamentam o emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos, existem diversas especificidades que tornam difícil essa utilização, tais como: a) pouca eficiência na triagem da fração mineral do RCD; b) variabilidade intrínseca dos agregados de RCD reciclados; c) insuficiência dos métodos de controle de qualidade desses agregados; e d) deficiência de controle de processamento.

3.1 Pouca eficiência na triagem da fração mineral do RCD

As normas técnicas que discutem o emprego de agregados de RCD reciclados em concretos estruturais exigem que estes sejam constituídos quase que exclusivamente do resíduo de concreto. Na prática só é possível a obtenção de agregados de

RCD reciclados constituídos de concreto com o uso de demolição seletiva que separa, na origem, o concreto dos demais resíduos minerais de classe A das demais classes. Essa prática dificilmente ocorre, exceto quando são demolidas obras constituídas quase que exclusivamente de concreto, o que no Brasil são raras. Mesmo a Holanda, que é um país que recicla em torno de 90% do RCD (SYMONDS, 1999), somente 1% das empresas de demolição do país utilizam a técnica de demolição seletiva (KOWALCZYK et al., 2002). Neste país, o resíduo oriundo da demolição corresponde a grande parte dos resíduos de construção e demolição (ANGULO, 2000). Conseqüentemente, mesmo na Holanda, os agregados de RCD reciclados são pouco utilizados em concretos estruturais com resistência mecânica superior a 20 MPa (HENDRIKS, 2000). O mesmo deve ocorrer em outros países que possuem mercados de reciclagem menos consolidados.

No Brasil, mesmo com a aplicação integral da resolução 307 do Conama, será difícil a obtenção de agregados reciclados que atendam a essa exigência, uma vez que essa resolução não prevê a segregação entre as diferentes frações dos resíduos minerais da classe A, misturando os resíduos de concreto e de alvenaria.

Angulo e John (2002) compararam as características físicas e a composição por fases dos agregados graúdos de RCD reciclados produzidos na usina de reciclagem de Santo André (SP) com as recomendações japonesa e holandesa para uso desses agregados em concretos. Nenhuma das 36 amostras analisadas de agregados atendeu aos requisitos dessas normas para uso em concretos com resistência superior a 25 MPa. Isso ocorreu, principalmente, em função da presença de materiais não-minerais e de argamassas e cerâmicas, fases minerais classe A que prejudicam a classificação de acordo com as normas existentes. Porém, aproximadamente 50% das amostras analisadas desses agregados poderiam ser utilizadas em concretos sem função estrutural e com resistência mecânica inferior a 25 MPa.

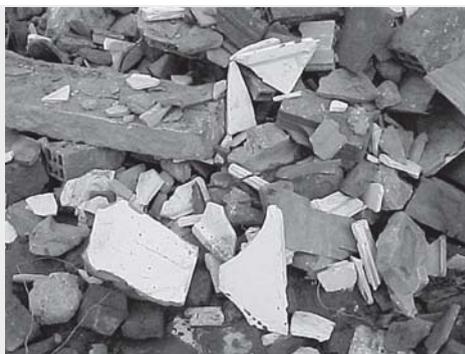
Na prática, nas usinas de reciclagem a triagem é feita por inspeção visual das cargas que chegam, sendo as cargas aparentemente muito contaminadas desviadas. No entanto, caçambas com aparência superficial de natureza mineral podem apre-

sentar quantidades elevadas de fração não mineral, conforme exemplificado na Figura 4a. Podem ainda existir nas usinas nacionais frações indesejáveis para a reciclagem, como gesso de construção (Figura 4b). A separação, na usina, das diferentes fases é tarefa difícil e cara.

O amianto também é misturado com a fração mineral do RCD em algumas usinas de reciclagem nacionais (Figura 5), embora sua segregação seja exigida na fonte de geração, segundo as Resoluções Conama nº 307 e 456.



(a)



(b)

Figura 4 – Contaminação excessiva por madeira, em uma caçamba de RCD, com aparência mineral, na superfície na usina de reciclagem de São Paulo (Itaquera) (a) e presença de gesso de construção na fração mineral do RCD na usina de reciclagem de Campinas (b)



Figura 5 – Telhas de amianto misturadas na fração mineral do RCD, em usina de reciclagem nacional

3.2 Variabilidade intrínseca dos agregados de RCD reciclados

As normas de agregados reciclados propõem a classificação dos agregados gerados nos seguintes tipos: agregados de concreto, alvenaria e misto (HENDRIKS, 2000; DIN, 2002; MULLER, 2004; ABNT, 2004), com o objetivo de reduzir a variabilidade das propriedades, entre os diferentes lotes, facilitando o emprego dos agregados de concreto na produção de novos concretos.

No entanto, embora exista uma melhora na homogeneidade dos agregados, ela não é suficiente, uma vez que existem concretos com propriedades muito distintas que, processados, vão gerar agregados reciclados bastante diferentes. Alaejos e Sánchez (2004) estudaram diferentes lotes de resíduos de concreto que chegavam a uma usina de reciclagem da Espanha, bem como os agregados com eles produzidos. A resistência à compressão de corpos-de-prova extraídos dos lotes de resíduos de concreto variou de 10,2 MPa a 53,3 MPa. Os agregados resultantes tiveram absorção de água – uma estimativa da porosidade – variando entre 4,9% e 9,7%, e massa específica aparente entre 2,09 kg/dm³ e 2,40 kg/dm³, o que teve grande impacto no desempenho mecânico dos concretos com eles produzidos. Além disso, os teores de outras fases presentes nesses agregados reciclados resultantes variaram de 0,4% a 17% da massa. Ou seja, agregados reciclados classificados como concreto apresentam propriedades muito variáveis.

Na Alemanha, Muller (2003) investigou a composição e as propriedades físicas dos agregados reciclados, classificados como alvenaria, provenientes de dez usinas de reciclagem. Os teores de concreto desses agregados variaram de 0% a 60% e os teores de argamassa e de cerâmica porosa de 0% a 50%, resultando numa variação nos valores de massa específica aparente de 1,49 kg/dm³ a 2,22 kg/dm³.

Se, para países europeus, em que obras costumam ser compostas predominantemente de concretos, a normalização existente é deficiente, a situação fica mais complexa no Brasil, em que, tipicamente, a obra costuma ser uma combinação de concreto e alvenaria, e a demolição seletiva é feita somente em obras históricas, visando à remoção de peças de valor, como esquadrias, componentes de madeira e,

eventualmente, tijolos maciços. Como consequência, os agregados produzidos são e serão, na maioria dos casos, mistos (ANGULO, 2000) e terão suas propriedades bastante variáveis ao longo do tempo, dificultando o desenvolvimento de mercado.

Algumas usinas nacionais, como a de Itaquera, São Paulo (SP), Vinhedo (SP) e Macaé (RJ), classificam os agregados reciclados em dois diferentes tipos: cinza (visualmente com predominância de componentes de construção de natureza cimentícia); e vermelho (visualmente com predominância de componentes de construção de natureza cerâmica, especialmente do tipo vermelha). A Tabela 1, elaborada a partir de três amostras representativas de cerca de 20 dias de produção, mostra que as propriedades dos agregados graúdos dos dois tipos não são muito diferentes, exceto pela coloração, e que os agregados gerados têm propriedades muito variáveis. A absorção de água desses agregados variou de 0% a 30% e a massa específica aparente de 1,50 kg/dm³ a 2,67 kg/dm³, observando-se um teor máximo de 72% de cerâmica vermelha.

Propriedades dos agregados	Fração mineral do RCD		
	Itaquera vermelho	Itaquera cinza	Vinhedo vermelho
Teor de materiais não-minerais (média, %)	0,75	0,05	0,14
Teor de cerâmica vermelha (faixa de variação, %)	0-38	0-29	0-72
Absorção de água (faixa de variação, %)	0,3-27,3	0,7-32,7	1,0-23,7
Massa específica aparente (faixa de variação, kg/dm ³)	1,50-2,62	1,50-2,60	1,62-2,67

Tabela 1 – Variabilidade na composição e propriedades físicas dos agregados reciclados obtidos do RCD mineral cinza e vermelho

Como a resistência mecânica de um material diminui exponencialmente com o aumento da porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994; CALLISTER, 2000), é de se esperar que diferentes lotes desses agregados resultem em concretos com grande variação de propriedades mecânicas, o que reduz a atratividade desses agregados e implica aumento da resistência de dosagem e consumo de cimento do concreto. A variação da porosidade também vai afetar o comportamento, no estado fresco, do concreto confeccionado com esses agregados (ANGULO, 2005).

Outra conclusão deste estudo é que as propriedades e a composição dos agregados foram bastante influenciadas pela origem do RCD. O teor de cerâmica vermelha foi mais influenciado pela origem do agregado (Itaquera ou Vinhedo) do que pela classificação. Nesses agregados, os teores médios de materiais não-minerais foram baixos.

3.3 Insuficiência dos métodos de controle de qualidade

As normas para uso de agregados graúdos de RCD reciclados em concretos impõem limites máximos de presença de outras fases minerais que não o concreto, tais como argamassa, cerâmica vermelha, etc., e controlam valores mínimos da massa específica aparente média ou máximos de absorção de água (RILEM RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000; DIN, 2002; ABNT, 2004). Esses valores não permitem estabelecer uma relação clara entre as propriedades dos agregados de RCD reciclados e as propriedades mecânicas dos concretos produzidos.

180

A determinação do teor das diferentes fases minerais presentes nos agregados, prevista nas normas, é realizada por catação manual, baseada em inspeção visual. Esse método é trabalhoso, demorado, caro (ANGULO, 2000), subjetivo (HENDRIKS, 2000; SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997) e sujeito a erro por desatenção ou fadiga. Sua principal virtude é a simplicidade.

Por outro lado, a porosidade, que é uma propriedade que está intimamente relacionada com as propriedades físicas dos agregados, é um critério mais interes-

sante, por influenciar a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos (CALLISTER, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 1994; LIMBACHYIA et al., 2000; WIRQUIN et al., 2000). A quase totalidade das normas especifica valores médios mínimos para a massa específica aparente do grão e/ou máximos para a absorção de água, propriedades relacionadas à porosidade. No entanto, quando se trabalha com valores médios, não se controla a dispersão do parâmetro, que pode ser importante no desempenho do produto. A única recomendação a adotar um controle de teor máximo de porosidade elevada é a RILEM, que controla os teores de massa abaixo de uma densidade de $2,0 \text{ g/cm}^3$, medida pela separação por líquidos densos.

3.4 Necessidade de controle no processamento do RCD mineral

A reciclagem da fração mineral do RCD é um processo de tratamento de minérios constituído pela seqüência de operações unitárias, com o objetivo de, a partir de uma matéria-prima de composição variável, produzir um concentrado com qualidade física e química adequada à sua utilização pela indústria de transformação (metalúrgica, química, cerâmica, vidreira, concreto, pavimentação, etc.) (JONES, 1987; SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997; LUZ et al., 1998; CHAVES, 1996).

As variações na forma de processamento influenciam não somente a remoção de frações indesejáveis no processo – como fração não-mineral, gesso, vidro e outros – mas também em aspectos críticos, como teor de finos (menor que 0,15 mm) e até a proporção entre as frações graúda e miúda.

A Tabela 2 mostra as operações unitárias bem como os equipamentos encontrados nas usinas de reciclagem nacionais e internacionais. Com exceção da usina de Socorro, todas as usinas nacionais são via seca e compostas de alimentação, catação, cominuição e, em alguns casos, separação granulométrica, separação magnética de metais ferrosos e abatedores de poeira. Essa configuração é também encontrada em usinas européias, que, no entanto, contam com operações de concentração e de separação da fração não-mineral mais eficientes (JUNGMANN et al., 1997; HANISCH, 1998; KOHLER; KURKOWSKI, 2000).

Usinas de reciclagem	Equipamentos de cominuição	Equipamentos de separação por tamanhos	Operações de concentração	Operações auxiliares
<i>Santo André</i> ¹ São Paulo/Brasil	Britador de impacto (10 t/h)	Peneira # 12,7 mm	Catação (AC)	1 TC
<i>São Paulo (Itaquera)</i> São Paulo/Brasil	Britador de impacto (100 t/h)	Peneiras # 40, 20 e 4,8 mm	Catação (AC/PC) Sep. magnética	2,5 TC
<i>Vinhedo</i> São Paulo/Brasil	Britador de mandíbulas (8 t/h)	Peneiras # 12,7, 9,5 e 4,8 mm	Catação (AC)	1 TC 1 AP
<i>Ribeirão Preto</i> ² São Paulo/Brasil	Britador de impacto (30 t/h)	Nd	Catação (AC) Sep. magnética	1 TC 1 AP
<i>Socorro</i> ⁴ São Paulo/Brasil	Britador de mandíbulas (2,5 t/h) Moinho de impacto	Peneiras # 20, 4,8 e 1,2 mm	Catação (AC) Sep. magnética	Classificador à úmido
<i>Piracicaba</i> São Paulo/Brasil	Britador de mandíbulas	Peneiras # 12,7, 9,5 e 4,8 mm	Catação (AC) Sep. magnética	2 TC
<i>Campinas</i> São Paulo/Brasil	Britador de impacto (80 t/h)	Peneiras # 50, 25,4, 12,7 e 4,8 mm	Catação (AC) Sep. magnética	2,5 TC
<i>Londrina</i> Paraná/Brasil	Britador de impacto Moinho de martelos	Peneiras # 4,8 mm	Catação (AC)	1 TC
<i>Belo Horizonte (Pampulha)</i> Minas Gerais/Brasil	Britador de impacto (30 t/h)	Peneiras	Catação (AC) ⁵	1 TC 1 AP
<i>Belo Horizonte (Estoril)</i> ³ Minas Gerais/Brasil	Britador de impacto (25 t/h)	Nd	Catação (AC)	1 TC
<i>Macaé</i> Rio de Janeiro/Brasil	Britador de impacto (6-8 t/h)	Nd	Catação (AC) Sep. magnética	1 TC
<i>Alemanha</i> ⁶	Britador de mandíbulas (1º estágio) Britador de impacto (2º estágio)	Escalpe # 12 e 120 mm Peneiras # 45, 32, 16, 8 mm	Catação (AC) Sep. magnética (2) "Scrubber"	TC (vários)
"Sistema Hazemag" Holanda ⁷	Britador de impacto	Peneiras # 80, 40, 10 mm	Catação (AC) Sep. Pneumática	TC (8)
<i>Salzburg</i> Áustria	Britador de impacto	Peneiras # 32, 16 e 4 mm	Catação (PC) Jigue	Rec. de água Desaguador Trat. das lamas

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.

² Conforme Zordan (1997). ³ Conforme Pinto (1999). ⁴ Fonte: L. Miranda. ⁵ Realizada em pilhas horizontais.

⁶ Conforme Muller (2003). ⁷ Conforme Hendriks (2000).

Tabela 2 – Operações unitárias e equipamentos encontrados em algumas usinas fixas nacionais e internacionais de reciclagem da fração mineral do RCD

A Figura 6 apresenta a seqüência de operações unitárias, típica de unidades de processamento da fração mineral de RCD, no Brasil. Essa seqüência de processamento é bastante simples e muito diferente de uma alemã, apresentada por Muller (2003) (Figura 7).

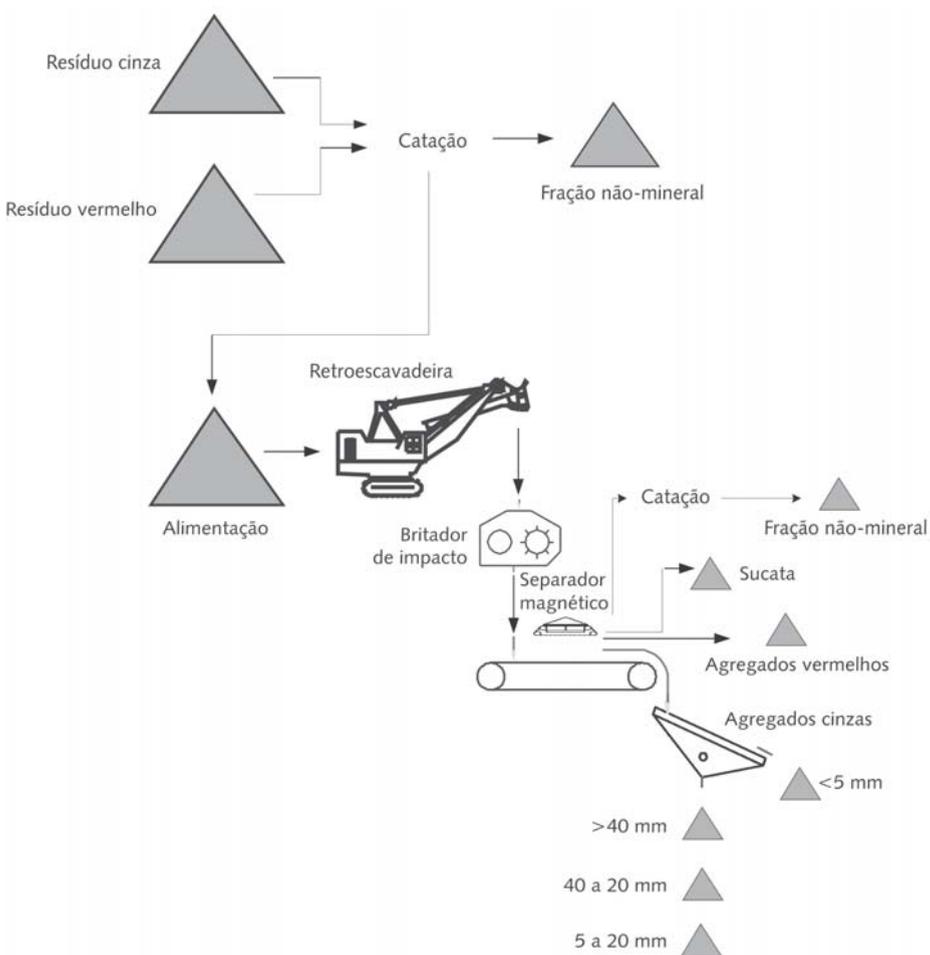


Figura 6 – Fluxograma da usina de reciclagem da fração mineral do RCD de Itaquera – São Paulo (SP)

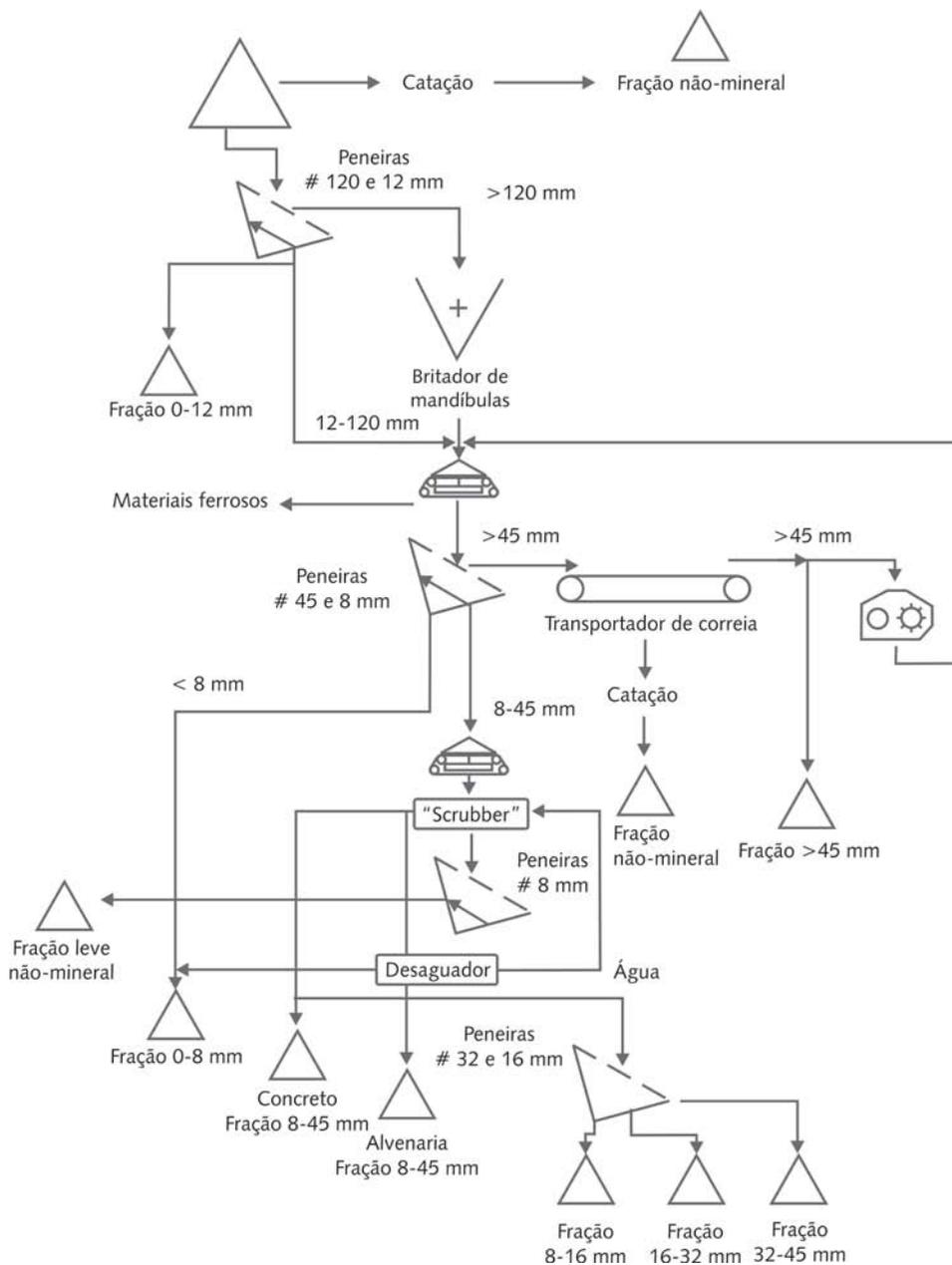


Figura 7 – Fluxograma de uma usina de reciclagem da fração mineral do RCD, na Alemanha (MULLER, 2003, adaptado)

No Brasil, um estudo de Angulo (2000), realizado na usina piloto de Santo André, a qual removia a fração não-mineral por catação manual antes e após a cominuição, verificou que o teor de contaminantes nos agregados produzidos variou de 0% a 3,5%. Internacionalmente, aceita-se que o teor de contaminantes deve ser inferior a 1,5% para agregados destinados à produção de concretos estruturais, com resistência mecânica superior a 25 MPa (RILEM RECOMMENDATION, 1994; MULLER, 2004). Assim, esses procedimentos de remoção por catação manual dos contaminantes, comumente adotados no Brasil, podem inviabilizar o emprego de uma parcela dos agregados de RCD reciclados em concretos, pois padecem dos mesmos problemas descritos quando se discutiu a catação como controle de qualidade dos lotes.

No exterior, para executar essa tarefa, são utilizados classificadores mecânicos, que geram uma corrente de ar e separam, com mais eficiência, partículas leves de papel, plásticos, madeiras, etc., dos agregados de RCD reciclados (HANISCH, 1998; KOHLER; KURKOWSKI, 2002), além de outros métodos, como a concentração gravítica.

A concentração gravítica, por meio de jiges, também pode ser eficiente para separar uma fração leve (mineral ou não-mineral) presente nos agregados de RCD reciclados. Esse método traz também benefícios indiretos, como a redução do teor de finos nos agregados e a redução da emissão de particulados, um problema ambiental e de saúde dos trabalhadores, comum em usinas que operam por via seca. No jigue (Figura 8), as partículas são separadas pela massa específica aparente do grão, 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.

Foi observado em algumas usinas brasileiras que uma parcela significativa da fração fina ($< 75 \mu\text{m}$) pode estar misturada com a fração mineral do RCD (Figura 9). Isso pode prejudicar a qualidade dos agregados de RCD reciclados, tanto pela presença de argilominerais como por sua quantidade, por demandar aumento de consumo de água em concretos. Em um estudo realizado em uma usina nacional, os teores de finos em agregados miúdos atingiram até 30% da massa total (MIRANDA et al., 2002).

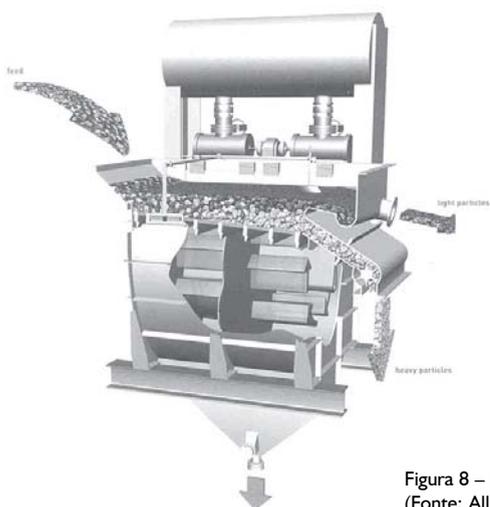


Figura 8 – Desenho esquemático sobre o funcionamento do jige
(Fonte: Allmineral Aufbereitungstechnik GmbH&Co/Alemanha)



Figura 9 – Mistura de solo com a fração mineral do RCD na usina de reciclagem de Campinas

Uma análise do balanço de massa dos agregados de RCD reciclados foi realizada nas usinas de reciclagem de Vinhedo e de Itaquera (ANGULO et al., 2003). Nessas usinas, as frações granulométricas maiores que 25,4 mm, que são inadequadas para o uso em concreto convencional, representaram de 20% a 45% da massa. Embora a fração miúda (menor que 4,8 mm) dos agregados de RCD reciclados não seja normalmente utilizada em concretos, ela representa em torno de 40% da massa total, e o seu uso é fundamental para a viabilidade técnica das usinas de

reciclagem. Esse arranjo de produção, portanto, limita a utilização da maior parte dos agregados gerados como base de pavimentação.

4 Controle da qualidade dos agregados de RCD reciclados para concreto

Ante a pouca eficiência da classificação do RCD mineral, a variabilidade intrínseca dos agregados de RCD reciclados e das fases presentes, a baixa correlação dos resultados de controle de qualidade tradicionais desses agregados com o desempenho dos concretos e a possibilidade industrial de separar os produtos, de acordo com a porosidade (ou massa específica aparente do grão), propõe-se um método de controle de qualidade baseado na caracterização direta de amostras representativas provenientes de lotes de agregados de RCD produzidos.

4.1 Considerações sobre a amostragem

A eficiência de qualquer metodologia de controle de qualidade por amostragem depende da representatividade da amostra (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997).

John e Angulo (2003) apresentam uma forma de estimar a massa representativa média necessária de um resíduo, a partir de suas características, por meio da aplicação da Teoria de Pierre Gy, que é comumente utilizada na Engenharia Mineral (PITARD, 1993; JONES, 1987).

Existem diversas formas de elaborar um plano de amostragem, composto da coleta de alíquotas, de forma aleatória ou sistemática (LUZ et al., 1998). Pode-se obter o produto médio representativo, através da construção de uma pilha alongada, composta das alíquotas coletadas, sendo construída em camadas com a direção de distribuição alternada, conforme procedimento apresentado na Figura 10. No final da coleta, as extremidades devem ser retomadas e redistribuídas, seguindo o mesmo procedimento. Essa técnica de pilha pode, também, ser empregada para a produção de lotes industriais homogêneos de agregados. Detalhes de um procedimento que se revelou adequado aos agregados de RCD podem ser encontrados em Angulo (2005).

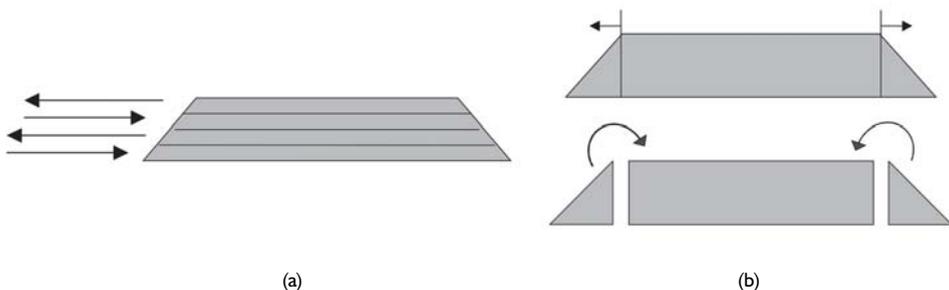


Figura 10 – Formação da pilha alongada (a) e corte e retomada dos extremos da pilha (b)

4.2 Separação densitária dos agregados de RCD reciclados

Dada a relativa homogeneidade de composição química das diferentes fases presentes na fração mineral de RCD – composta essencialmente de SiO_2 , CaO e Al_2O_3 , conforme detalhadamente demonstrado por Angulo (2005) –, as variações na massa específica aparente dos agregados de RCD reciclados são devidas às variações na porosidade, propriedade que controla a resistência mecânica dos materiais porosos. Assim, uma classificação por densidade é, indiretamente, uma classificação por resistência mecânica dos grãos desses agregados.

A separação por líquidos densos é um método de separação densitária, em escala de laboratório, que separa os agregados de RCD reciclados, em função da massa específica aparente dos grãos que os constituem. Através da imersão em líquido de densidade definida é possível separar as partículas mais leves, que flutuam, das mais pesadas, que afundam (JONES, 1987; BURT, 1984; SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997; CAMPOS; LUZ, 1998).

Nessa operação de laboratório, normalmente, utilizam-se 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 $4,3 \text{ g/cm}^3$ (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997; CAMPOS; LUZ, 1998).

A absorção do líquido pelas partículas porosas é uma variável interveniente a ser considerada. Nos estudos realizados, essa variável introduziu um erro sistemático (ver Figura 14), que pode ser corrigido (ANGULO, 2005).

A Figura 11 apresenta o desenho esquemático da separação por líquidos densos. As partículas, quando imersas em béquer, na solução com densidade conhecida, são agitadas levemente com bastão, definindo o flutuado e o afundado. Após essa definição visual, o flutuado é 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 é separado em outro béquer, sendo a fração de líquido remanescente filtrada, seguindo o mesmo procedimento. Após a remoção do excesso de líquido denso, o flutuado e o afundado são 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.

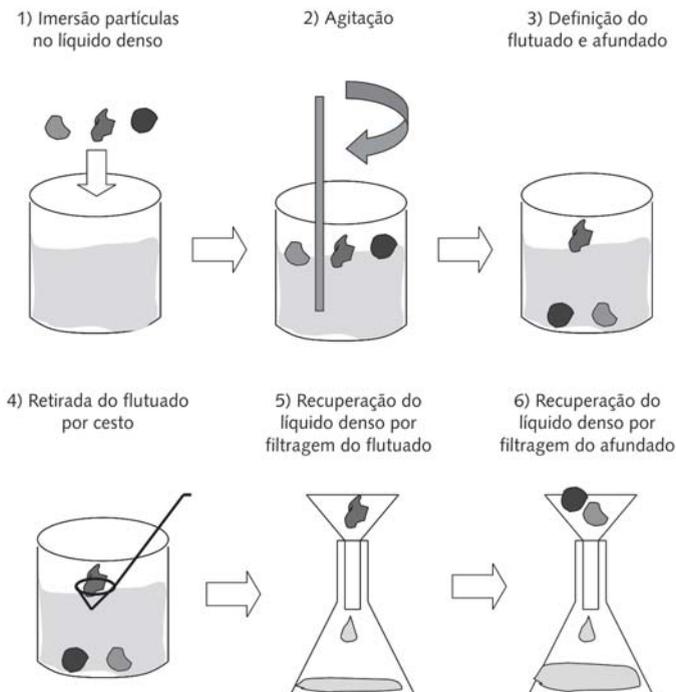


Figura 11 – Desenho esquemático que ilustra separação por líquidos densos

A Figura 12 exemplifica a prática usual em laboratório.

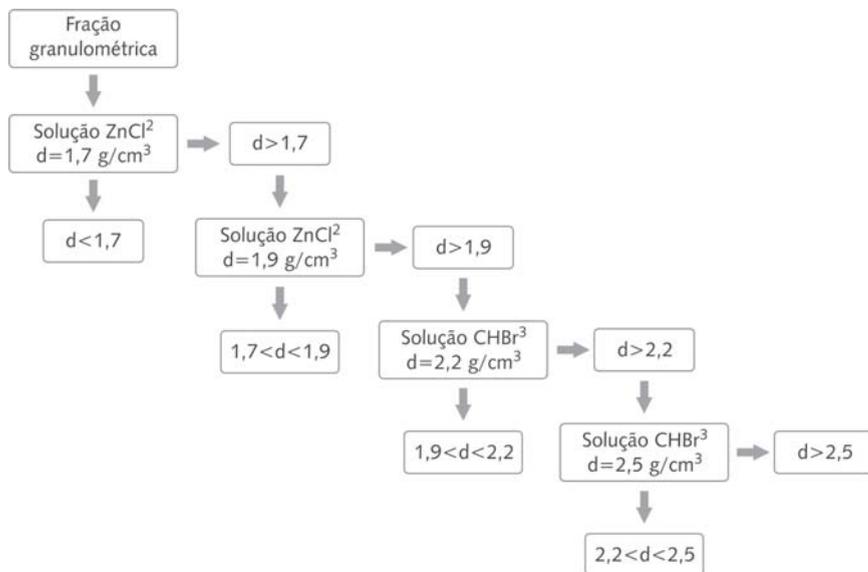


Figura 12 – Separação sequencial em densidades crescentes por líquidos densos

Angulo (2005) caracterizou amostras representativas de três diferentes tipos de agregados graúdos de RCD reciclados das usinas de Itaquera e de Vinhedo (SP), por separação sequencial por líquidos densos. A Figura 13 mostra a distribuição em massa ponderada da fração graúda, expressa em porcentagem, desses agregados, nos intervalos densidade. Eles são compostos de partículas de diferentes porosidades; ou seja, partículas com diferentes valores de massa específica aparente e de absorção de água, conforme os dados apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4.

A Figura 14 mostra a distribuição dos valores (mínimos, médias, máximos) de massa específica aparente desses agregados. Esses valores não coincidem com os valores de densidade estabelecidos pelos intervalos, especialmente para os intervalos menos densos ($1,7 < d < 2,5$), que são compostos de partículas mais porosas. A absorção dos líquidos densos aumentou a densidade aparente das partículas porosas, fazendo com que a massa específica aparente real seja menor do que a prevista pelo líquido denso. O erro introduzido é nulo para a fração pouco porosa (massa específica aparente de $2,61 \text{ g/cm}^3$) e cresce na razão direta da porosidade.

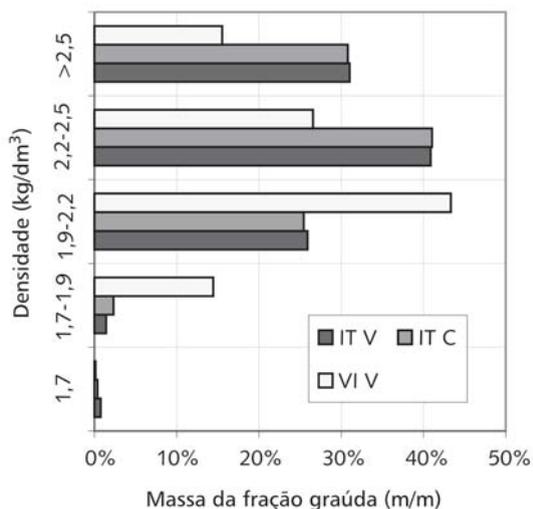


Figura 13 – Distribuição em massa ponderada dos três diferentes tipos de agregados graúdos de RCD reciclados, nos intervalos de densidade. IT C – Itaquera cinza, IT V – Itaquera vermelho, e VI V – Vinhedo vermelho

Fração (mm)	Intervalos da separação por líquidos densos (g/cm³)											
	1,7<d<1,9			1,9<d<2,2			2,2<d<2,5			D>2,5		
	IT C	IT V	VI V	IT C	IT V	VI V	IT C	IT V	VI V	IT C	IT V	VI V
-25,4+19,1	1,77	1,50	1,70	2,03	1,99	1,93	2,34	2,14	2,27	2,60	2,62	2,61
-19,1+12,7	1,73	1,61	1,72	1,99	2,02	1,90	2,18	2,12	2,24	2,59	2,55	2,62
-12,7+9,5	1,66	1,59	1,71	1,93	1,98	1,83	2,15	2,12	2,15	2,63	2,59	2,67
-9,5+4,8	1,50	1,52	1,62	1,95	1,88	1,96	2,11	2,15	2,09	2,60	2,60	2,58
MP	1,68	1,56	1,70	1,98	1,96	1,91	2,20	2,13	2,21	2,60	2,59	2,62
DP	0,12	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,10	0,08	0,01	0,02	0,02	0,04
CV	7,1	3,4	2,7	2,0	2,6	3,1	4,5	3,7	0,5	0,8	0,8	1,5

MP, DP e CV significam média ponderada, desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente.

Tabela 3 – Valores de massa específica aparente (kg/dm³) das frações dos agregados graúdos de RCD reciclados

Fração (mm)	Intervalos da separação por líquidos densos (g/cm ³)											
	1,7<d<1,9			1,9<d<2,2			2,2<d<2,5			D>2,5		
	IT C	IT V	VI V	IT C	IT V	VI V	IT C	IT V	VI V	IT C	IT V	VI V
-25,4+19,1	17,9	25,9	20,7	7,1	11,6	7,9	3,8	7,1	4,3	0,7	0,9	1,3
-19,1+12,7	18,5	23,9	20,7	6,4	11,8	9,2	3,9	7,4	6,9	1,8	0,6	1,4
-12,7+9,5	21,9	25,1	22,0	6,5	14,7	10,3	5,5	8,2	6,4	1,1	0,3	1,0
-9,5+4,8	32,7	27,3	23,7	10,5	9,4	10,5	7,0	7,6	7,4	1,3	1,3	1,1
MP	22,1	25,7	21,3	7,5	11,6	9,2	4,8	7,6	6,2	1,3	0,8	1,3
DP	6,9	1,4	1,4	1,9	2,2	1,2	1,5	0,5	1,4	0,5	0,4	0,2
CV	31,0	5,6	6,7	25,7	18,7	13,0	31,4	6,1	21,9	35,4	52,2	14,3

MP, DP e CV significam média ponderada, desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente.

Tabela 4 – Valores de absorção de água (% kg/kg) das frações dos agregados graúdos de RCD reciclados

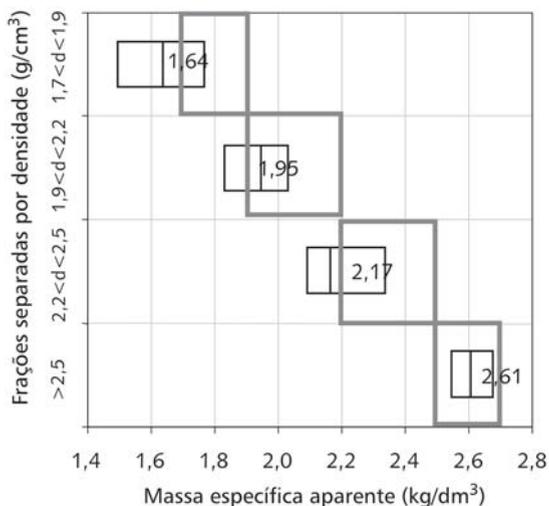
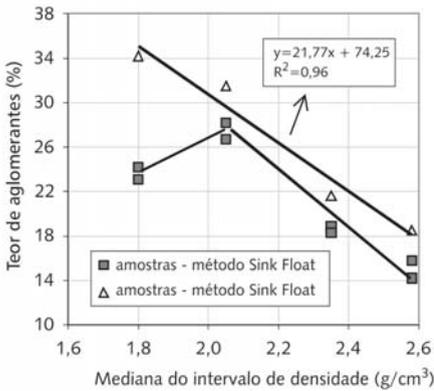


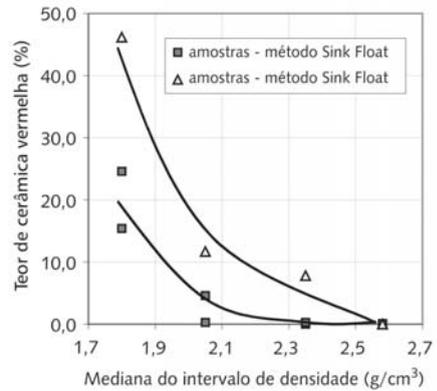
Figura 14 – Distribuição dos valores (mínimos, médias, máximos) de massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD reciclados separados por densidade. Em verde: densidade no intervalo

Os resultados revelam que a porosidade dos agregados tem duas origens principais: teor de aglomerantes; e cerâmica vermelha (Figura 15). O teor de aglomerantes – compostos predominantemente de pasta de cimento ou de cal endurecida³ – pode ser determinado pelo ataque com solução de ácido clorídrico a 33%. Tanto o teor de aglomerantes quanto o teor de cerâmica vermelha diminuem com o aumento da massa específica aparente.

Betume, madeira, gesso, fibrocimento e outros contaminantes ficaram concentrados nas densidades abaixo de 1,9 g/cm³. Portanto, além de classificar conforme a porosidade, o método permite estimar indiretamente o nível de contaminantes.



(a)



(b)

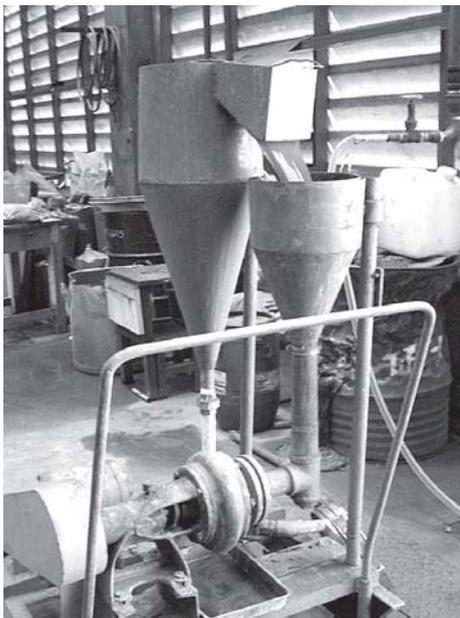
Figura 15 – Teores de aglomerantes (a), de cerâmica vermelha (b) em função da mediana do intervalo de separação por densidade pelo “Sink and Float” e pelos líquidos densos (valores médios)

4.3 Massa específica aparente *versus* desempenho do agregado no concreto

Visando verificar a adequação do método de classificação, baseado em faixas de massa específica aparente do grão, foi realizado um experimento laboratorial.

³ Nas amostras analisadas a presença do gesso foi quase desprezível.

Para a obtenção de agregados reciclados classificados em diferentes faixas de massa específica aparente, em quantidades suficientes para estudos de dosagem de concretos, foi utilizado um cone de separação estática em meio denso (LUZ et al., 1998), da Denver, denominado *Sink and Float*, de escala piloto (Figura 16). A Figura 17 mostra o desenho esquemático do funcionamento desse equipamento. Assim, foram classificadas 1 tonelada de RCD processado do tipo cinza e 1 tonelada do tipo vermelho, coletadas na usina de reciclagem de Itaquera. Esse material foi peneirado entre 19,1 mm e 9,5 mm, lavado e, a seguir, separado nos seguintes intervalos de densidade (g/cm^3): $d < 1,9$; $1,9 < d < 2,2$; $2,2 < d < 2,5$; e $d > 2,5$. A polpa do meio denso foi obtida por uma mistura de ferro-silício (liga constituída por silício (15%) e ferro (85%), com massa específica aproximada de $6,9 \text{ kg}/\text{dm}^3$). Essa polpa pode atingir uma densidade máxima em torno de $3,4 \text{ g}/\text{cm}^3$, limite que atende às restrições impostas no experimento.



(a)



(b)

Figura 16 – Equipamento “Sink and Float”, da Denver (a) e o ferro-silício em pó (b)

A operação do equipamento é simples, mas deve ser feita de forma controlada. Inicialmente, a água pura é adicionada no equipamento, até iniciar a circulação. Em seguida, o ferro-silício é adicionado, progressivamente, até a polpa adquirir a densidade desejada, com variação admissível de $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. A densidade de polpa é determinada pela razão da massa e do volume em uma proveta graduada de 1000 mL, coletada em intervalos regulares de 5 segundos. Ela é monitorada, periodicamente, a cada três baldes de 8 L de agregados alimentados no equipamento, e o ferro-silício que sedimenta é recirculado, a partir de uma torneira situada na parte inferior do equipamento.

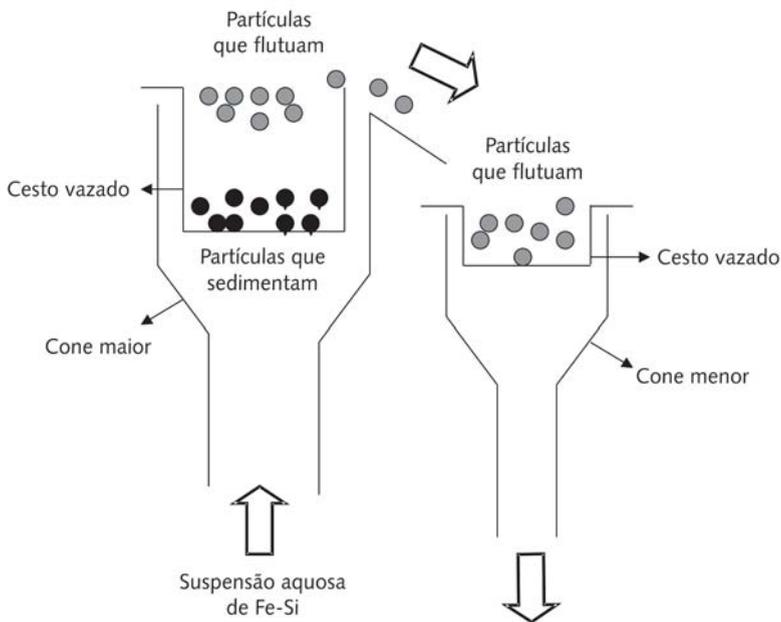


Figura 17 – Desenho esquemático sobre o funcionamento do equipamento "Sink and Float"

O método de dosagem dos concretos adotou um volume fixo para os agregados grãos de RCD reciclados. Não se deve usar diretamente o método de dosagem do IPT-EP USP (HELENE; TERZIAN, 1992), pois a fixação dos traços unitários em massa conduz a uma diferença volumétrica dos agregados grãos nos concretos, resultado da variação dos valores de massa específica aparente média (LEITE, 2001; LARRARD, 1999). A variação dos traços, prevista no diagrama de

dosagem de concretos, foi realizada por meio da adoção de três diferentes consumos de cimento (kg/m³) para os concretos: 300, 400 e 500 (CARRIJO, 2005, ANGULO, 2005). Nesse caso, admitiu-se, portanto, uma variação de 9% a 11% na relação entre a água e materiais secos, e uma variação de 0,51 a 0,61 na proporção entre areia e os agregados graúdos. A consistência do concreto foi mantida dentro de um limite de variação plástica, empregando-se um aditivo.

Os resultados experimentais demonstraram que a massa específica aparente dos agregados controlou a resistência mecânica de concretos, confeccionados com mesmo consumo de cimento – ou relação entre água e cimento (Figura 18). A soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha também se revelou um indicador eficiente do desempenho mecânico. As mesmas conclusões foram obtidas para o módulo de elasticidade e absorção de água dos concretos.

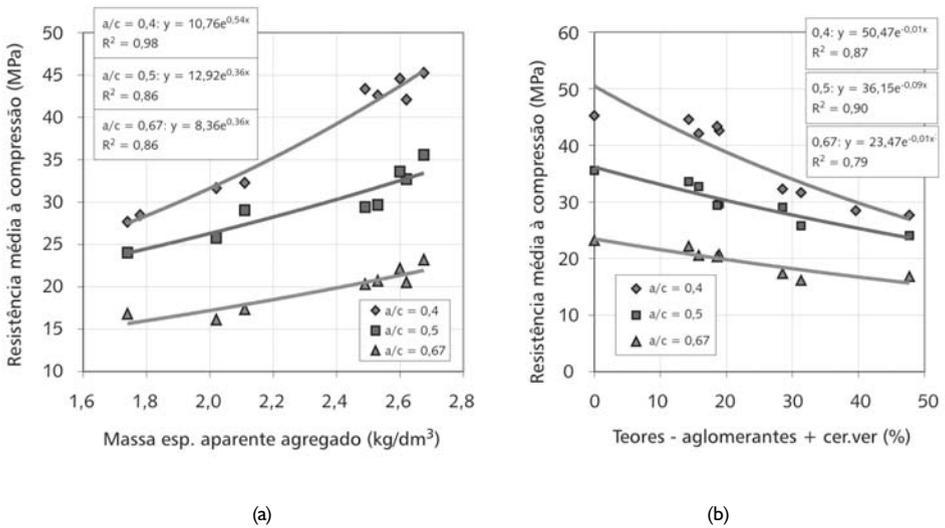


Figura 18 – Resistência média à compressão dos concretos, em função dos valores de massa específica aparente (a) e a soma dos teores de aglomerantes e da fase cerâmica vermelha (b) dos agregados graúdos de RCD reciclados contidos nos diversos intervalos de densidade, para as diferentes relações entre água e cimento ou consumos de cimento

O consumo de cimento pode variar significativamente com esses agregados, em função do valor de resistência à compressão que se pretende atingir. Conforme a Figura 19, não é economicamente viável e ambientalmente eficiente a produção de

concretos com resistência acima de 20 MPa, com agregados contidos nos intervalos $d < 1,9$ e $1,9 < d < 2,2$, exceto em situações em que não se disponha de alternativas.

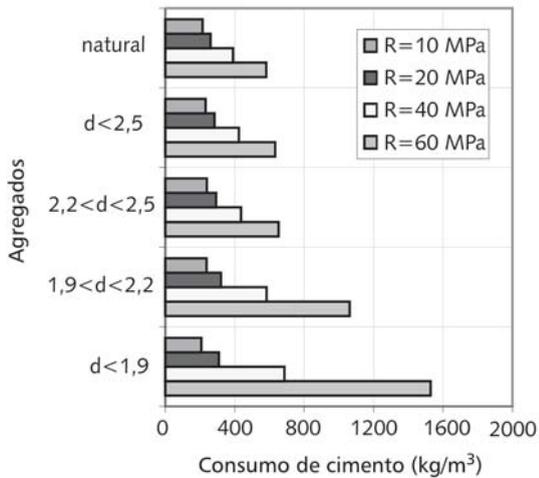


Figura 19 – Variação do consumo de cimento nos concretos produzidos com agregados graúdos de RCD reciclados, separados por densidade, para diferentes valores de resistência à compressão

Os estudos realizados até o momento empregaram lotes de agregados situados dentro de diferentes faixas de densidade. Não se dispõe, até o momento, de resultados que demonstrem o efeito da mistura de agregados com densidades muito diferentes nas propriedades mecânicas. Pesquisa em andamento está iniciando a investigação do tema, buscando estabelecer modelos que permitam, a partir da distribuição de massa específica aparente desses agregados, estimar a resistência máxima com a qual um lote de agregado pode ser economicamente competitivo e ambientalmente sustentável.

5 Conclusões

Classificar o RCD mineral em resíduos de concreto, de alvenaria ou mistos não garante agregados reciclados com composição e propriedades físicas constantes, o que dificulta sua inserção nos diversos setores de agregados.

A qualidade potencial de um lote de agregado de RCD reciclado, para uso em concretos, deve ser avaliada diretamente a partir de uma amostra representativa, empregando um método de caracterização que correlacione as características desses agregados com as propriedades mecânicas do concreto.

A separação por líquidos densos é uma técnica eficiente para separar os agregados graúdos de RCD reciclados em faixas de massa específica aparente e, indiretamente, determinar o teor de alguns contaminantes de baixa massa específica presentes.

Os agregados graúdos de RCD reciclados são compostos de conteúdos distintos de massa, dentro dos intervalos de densidade, sendo, portanto, uma mistura de subgrupos de agregados separados em faixas de massa específica aparente. Os teores dos aglomerantes e da cerâmica vermelha nesses agregados reduzem com o aumento da massa específica aparente.

Quando o agregado reciclado é separado em faixas de diferentes densidades, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a absorção de água dos concretos são influenciados pela massa específica aparente do grão (ou porosidade) do agregado. Assim, a massa específica aparente é um parâmetro de controle de qualidade que pode ser facilmente empregado em usinas de reciclagem, para caracterizar os lotes de agregados de RCD reciclados, direcionando-os para os mercados em que serão mais competitivos.

O conceito de separação dos agregados em diferentes faixas de densidade pode, também, ser implementado nas usinas de reciclagem, pois existem equipamentos de concentração gravítica, tais como o jig, capazes de segregar os produtos de acordo com a densidade. Nesse cenário, os agregados com massa específica aparente do grão maior que $2,2 \text{ kg/dm}^3$ poderiam ser destinados ao mercado de concretos estruturais convencionais, onde serão competitivos econômica e ambientalmente, e os produtos menos densos, para outros mercados menos exigentes, como pavimentação. Na usina de Itaquera, os agregados mais densos representaram mais de 50% da massa total. A viabilidade econômica dessa abordagem deverá ser decidida em função de características e escala do mercado local e da qualidade dos resíduos disponíveis.

Como a massa específica aparente desses agregados está correlacionada com a soma dos teores de aglomerantes e de cerâmica vermelha – materiais responsáveis pela porosidade no agregado de RCD reciclado –, as propriedades dos concretos também podem ser controladas por meio dessa soma, podendo substituir a separação por densidade no controle de qualidade através do laboratório. Essa correlação, no entanto, deve ser estabelecida em cada usina de reciclagem, considerando as diferenças da indústria de materiais e das práticas construtivas entre regiões brasileiras.

Finalmente, o uso de agregados reciclados afeta outros parâmetros relevantes no desempenho dos concretos, tais como retração e fluência. A influência da massa específica aparente dos agregados nesses parâmetros deve ser também investigada.

6 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR**

15116: agregados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

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...** Bagnaux, France: Elsevier, 2004. v. 2, p. 693-702.

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.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

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

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. 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...** Florianópolis: ANTAC, 2002. p. 1613-1624.

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. 2002. p. 293-307.

200

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...** São Paulo: IBRACON; IPEN. 2003. CD-ROM.

BURT, R. O. **Gravity concentration technology**. Amsterdam: Elsevier, 1984. v. 5, 605 p.

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...** Aachen, Germany: GMDB, 1997. p. 445-456.

BRITO, J. A. Cidade versus entulho. **Areia & Brita**, v. 2, n. 6, 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 characterization 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. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Signus, 1996. 2 v. 424 p.

COLLINS, R. Recycled concrete. **Quarry management**, v. 24, n. 12, p. 31-36, Dec. 1997.

DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 4226-100**: aggregates for mortar and concrete – part 100: recycled aggregates. Germany, 2002.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Management of construction and demolition waste**. Brussels, Belgium: 2000. Disponível em: <<http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment>>. Acesso em: 15 set. 2002. (DG ENV E.3).

HANISCH, J. Current developments in the sorting of building waste. **Aufbereitungs Technik**, v. 39, n. 10, 1998.

HELENE; P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

HENDRIKS, C. F. **The building cycle**. Delft: Aeneas, 2000. 231 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).

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.

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

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

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...** Toronto: National Research Council of Canada, 2004. CD-ROM.

JUNGMANN, A et al. Building rubble treatment using alljig in Europe and USA. **Aufbereitungs Technik**, v. 38, n. 10, p. 543-549, 1997.

KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. Optimizing the use of RCA. 2000. Disponível em: <http://www.b-im.de/public/deutag_remex/kohlerkurkowski.htm>. Acesso em: 5 jul. 2002.

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. 144 f. Tese (doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LARRARD, F. de. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach.**

London: E&FN Spon, 1999. 420 p.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** 2002. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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. 676 p.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MIRANDA, L.F.R. et al. Análise da variabilidade de agregados miúdos reciclados pela usina de Socorro (SP). In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON/IPEN. 2002.

MULLER, A. Recycling von Mauerwerkbruch – stand und neue verwertungswege (teil 1). **Ziegelindustrie International**, v. 56, n. 6, p. 17-25, 2003.

MULLER, A. Lightweight aggregates from masonry rubble. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings...** Bagneux, France: Elsevier, 2004. p. 97-106.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – 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, 1993. 488 p.

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**, v. 27, p. 557-59, 1994.

SANT'AGOSTINHO, L. M; KAHN, H. **Metodologia para caracterização tecnológica de matérias-primas minerais**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP BT/PMI/069, 1997. 29 p.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. 2003. 130 p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SYMONDS. Construction and demolition waste management practices and their economic impact, 1999. Disponível em: <<http://europe.eu.int/comm/environment>>. Acesso em: 14 set. 14, 2002.

TANNO, L. C.; MOTTA, J. F. M. Panorama setorial: minerais industriais. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 3, p. 37-40, maio/jun. 2000.

WHITAKER, W. **Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil**. São Paulo. 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

WIRQUIN, E. et al. Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité: application aux bétons de granulats recyclés. **Materials and structures**, n. 33, p. 403-08, 2000.

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

7 Equipe

Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo – PCC/USP

Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves – PMI/USP

Carina Ulsen (bolsista de IC) – PMI/USP

Engracia Bartuciotti – PCC/USP

Prof. Dr. Henrique Kahn – PMI/USP

Hilton Mariano (estagiário) – PCC/USP

Ivie F. Pietra (M. Eng.) – PCC/USP

Prof.^a Dra. Maria Alba Cincotto – PCC/USP

Paula Ciminelli Ramalho (bolsista de IC) – PCC/USP

Priscila Meireles Carrijo (M. Eng.) – PCC/USP

Raquel Massami Silva (bolsista de IC) – PCC/USP

Sérgio C. Ângulo (Dr. Eng.) – PCC/USP

Prof. Dr. Vanderley M. John – PCC/USP

8 Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (Finep/Habitare, Fundo Verde e Amarelo), ao SIDUSCON-SP, ao CNPq, à Fapesp, à Prefeitura de São Paulo (Sr. Dan Schneider e funcionários), à empresa Nortec (Sr. Artur Granato e funcionários), à Prefeitura de Vinhedo (Sr. Geraldo, Sr. Henrique e demais funcionários), a todos os membros da equipe e à Fusp pelo apoio na gestão dos recursos.