

Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição

Optical sorting of ceramic material from mixed construction and demolition waste aggregates

Sérgio Cirelli Angulo
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
Rua Professor Almeida Prado, 532,
Prédio 01, Cidade Universitária,
Butantã
São Paulo - SP - Brasil
CEP 05508-900
Tel.: (11) 3091-5793
E-mail: sergio.angulo@poli.usp.br

Vanderley Moacyr John
Departamento de Engenharia de
Construção Civil, Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-5793
E-mail: vanderley.john@poli.usp.br

Carina Ulsen
Departamento de Engenharia de
Minas e de Petróleo, Escola
Politécnica
Universidade de São Paulo
Av Prof. Mello Moraes, 2373, Cidade
Universitária, Butantã
São Paulo - SP - Brasil
CEP 05508-030
Tel.: (11) 3091-5151
E-mail: carina@lct.poli.usp.br

Henrique Kahn
Departamento de Engenharia de
Minas e de Petróleo, Escola
Politécnica
Universidade de São Paulo
E-mail: henrique@lct.poli.usp.br

Anette Mueller
Chair of Mineral Processing
of Building Materials and Reuse
Bauhaus Universität Weimar
Coudystr. 7
99421
Weimar, Germany
E-mail: anette.mueller@uni-weimar.de

Recebido em 01/07/12
Aceito em 18/03/13

Sérgio Cirelli Angulo
Vanderley Moacyr John
Carina Ulsen
Henrique Kahn
Anette Mueller

Resumo

A remoção de resíduos de cerâmica vermelha dos agregados mistos procedentes de resíduos de construção e demolição (RCD) deve ser priorizada para este material possa ser utilizado para a confecção de concreto. Isso pode ser realizado por meio de diferentes técnicas de processamento mineral, com princípios de separação, eficiência, custos e impactos ambientais distintos. A principal vantagem da separação óptica é o uso reduzido de água ou energia quando comparado com outros processos industriais. Este artigo tem por objetivo analisar os produtos obtidos por separação óptica de RCD mistos, com foco na remoção da cerâmica vermelha e consequente redução da porosidade dos agregados reciclados para uso em concreto. A remoção da cerâmica vermelha viabiliza a obtenção de um agregado reciclado essencialmente composto de concreto, com menor porosidade e cuja absorção de água varia entre 4% e 7%. No Brasil, teores de até 5% de cerâmica vermelha são esperados no produto (agregado triado), e a produção de concretos de 20 a 30 MPa torna-se viável com esse material.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição. Separação óptica. Agregados reciclados mistos. Concreto.

Abstract

The removal of red ceramic residues from mixed construction and demolition waste (CDW) is a priority if that waste is to be used as recycled aggregates in concrete. There are many processing techniques that fit this purpose, with different separation principles, efficiency levels, costs and environmental impacts. The main advantage of optical sorting is lower use of water or energy when compared with other processing techniques. The aim of this paper is to analyze the products obtained by automatic optical sorting, focusing on the removal of red ceramic from mixed CDW recycled coarse aggregates and the expected porosity reduction for their use in concrete. The product obtained is mainly composed of recycled concrete aggregates (RCA), with water absorption levels from 4 to 7%. In Brazil, contents of about 5% of red ceramic in the product (sorted aggregates) can be expected, and the production of 20-30 MPa concrete with this material is feasible.

Keywords: Construction and demolition waste. Optical sorting. Mixed recycled aggregates. Concrete.

Introdução

A reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição (RCD) ainda é pouco realizada no Brasil (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009). Mesmo na Europa, onde há países com índices de reciclagem acima de 70% (MÜLLER, 2003), grande parte dessa fração é destinada para nivelamento de terrenos ou sub-bases de estradas, raramente retornando ao mercado como agregados para aplicações mais nobres (concretos e argamassas). Levy (2001) apresenta uma lista de algumas dessas poucas obras emblemáticas que empregaram agregados de RCD reciclados em concretos: Deftse Zoom Housing Project/Holanda (painéis pré-fabricados de 272 unidades habitacionais), Edifício do Meio Ambiente no Building Research Establishment/Inglaterra (fundações, lajes e pilares de concreto), e Federal Gardening Exhibition/Alemanha (painéis arquitetônicos). Assim, a reciclagem ainda é um desafio tanto no Brasil quanto no Exterior, porque não é capaz efetivamente de reduzir a extração de recursos minerais e contribuir para a sustentabilidade na construção (JOHN, 2007).

A pesquisa nacional e internacional que trata da reciclagem da fração mineral dos RCD foi inicialmente direcionada para avaliar a influência dos agregados reciclados de resíduos de concreto ou reciclados de resíduos de alvenaria no desempenho do próprio concreto (HANSEN, 1992; BAZUCO, 1999; LEVY, 2001; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; BUTTLER, 2003). Com base na natureza mista dos agregados de RCD brasileiros (com presença de concreto e de cerâmica vermelha), Lima (1999) propôs critérios mínimos para aceitação deles para uso em argamassas e concretos, fundamentado na normalização internacional. Em estudo posterior, Leite (2001) empregou modelagem estatística para analisar a influência de teores crescentes de substituição dos agregados graúdos naturais por agregados mistos de RCD e da relação água/cimento efetiva (que implica o desconto da

água absorvida pelo mesmo) na resistência à compressão do concreto. Em todos os estudos, a viabilidade da substituição integral de agregados graúdos naturais por agregados mistos de RCD para concretos não estruturais (< 25 MPa) é confirmada, sendo, em seguida, tais critérios incorporados na norma brasileira (ABNT, 2004).

A Tabela 1 mostra que resíduos de concreto puro no Brasil representam menos de 45% da massa total dos RCD, dependendo da cidade, sendo o resíduo nacional frequentemente misturado com outros resíduos minerais (incluindo teores variados de cerâmica vermelha e solos, entre outros materiais). O desmonte seletivo de estruturas de concreto ainda é pouco praticado. Em diversos outros países, cerca de 30% dos RCD são mistos (MÜLLER, 2003).

Na Europa, devido à separação do resíduo de concreto na origem, agregados reciclados de concreto são geralmente menos porosos que os de alvenaria (que contêm cerâmica vermelha), tal como demonstrado por Müller (2003), por meio da análise da variação da massa específica e absorção de água desses agregados. Angulo (2005) identificou grande variação dessas propriedades nos agregados de RCD mistos no Brasil. Nesse caso, tanto a cerâmica vermelha como as partículas com alto teor de pasta cimentícia são responsáveis pelas elevadas porosidades.

Diversos estudos provam que a porosidade do agregado resultante de RCD reciclado é o principal responsável pela remoção da água, que confere plasticidade ao concreto (POON *et al.*, 2004), pela redução de sua resistência mecânica (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002) e sua durabilidade (WIRQUIN *et al.*, 2000). O prejuízo nessas propriedades inviabiliza o uso desses agregados porosos no concreto estrutural (ÂNGULO *et al.*, 2010), o que pode ser corrigido pelo aumento de cimento na mistura; no entanto, essa solução é econômica e ambientalmente inviável.

Tabela 1 - Composição das caçambas de RCD para diferentes cidades brasileiras¹

Cidades (Estado)	Solo misturado com o RCD (% das caçambas)	Resíduo de concreto puro (% das caçambas)
Maceió (AL)	nd	0
Macaé (RJ)	27	18
São Paulo (SP)	25	44

Nota: nd - não determinado.

¹ Dados de Convênio FINEP/CETEM/Poli USP/UFAL/Prefeitura de Macaé 01.05.0100.00 - Aperfeiçoamento do processo de reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição.

A produção de agregados de concreto reciclado para uso em concreto estrutural pode ser realizada por meio de tratamento térmico e moagem, conforme proposto por autores japoneses (NAGATAKI *et al.*, 2004; SHIMA *et al.*, 2005). Uma desvantagem é o uso intensivo de energia e emissão de CO₂ quando ocorrer o uso de combustíveis fósseis.

Na Europa, a separação densitária a úmido por jigagem² (SAMPAIO; TAVARES, 2005) tem sido utilizada para remover partículas orgânicas leves (madeira, plástico, etc.) ou partículas porosas de cerâmica vermelha, gerando agregado de RCD de elevada pureza mineral e densidade entre 2,2 e 2,4 kg/dm³ (DERKS, 1997). Uma das desvantagens desse equipamento é gerar um rejeito de material fino, alcalino, devido ao alto teor de cimento, o que altera a categoria do resíduo e exige uma disposição mais cautelosa e onerosa. Uma segunda desvantagem seria a separação imperfeita, devido à proximidade da densidade e à natureza porosa das partículas, com baixa recuperação e seletividade, levando algumas partículas leves a afundar junto com o produto pesado (MÜLLER; WIEKNKE, 2004). Uma terceira desvantagem seria o uso intenso de água no processo industrial.

Uma técnica de processamento de menor impacto ambiental seria a separação óptica, porque não requer uso intensivo de energia, nem de água. Os equipamentos de separação óptica (Figura 1) são compostos de um alimentador vibratório, que distribui partículas sobre transportadores de correia e as conduzem até os sensores, para registro das imagens. As partículas são identificadas pela cor e têm suas posições identificadas; compressores de ar devidamente posicionados são acionados para desviar o fluxo de partículas de cores predeterminadas, de modo que estas sejam coletadas separadamente das demais. Certamente, a cor branca do gesso facilita essa remoção de um conjunto de partículas predominantemente cinza e vermelho escuro.

CCD (dispositivo de carga acoplada) é um sensor para capturar imagens por circuito eletrônico. O desenvolvimento de sensores de maior resolução tem contribuído para o aumento da eficiência da separação. Além disso, houve aumento na capacidade de produção desses equipamentos resultante de maior capacidade de processamento digital dos computadores. Tais avanços técnicos resultaram na redução dos preços desses equipamentos (DEHLER, 2003).

Estudos exploratórios com RCD mistos, compostos de 47% de madeira, demonstraram a

viabilidade da separação da madeira, além do gesso (MULDER; DE JONG; FEENSTRA, 2007). Os dados desses autores revelam que existe potencial para separar cerâmica vermelha, mas tais dados não foram posteriormente confirmados. Destaca-se na literatura a utilização da separação óptica para remoção do gesso presente nos agregados de RCD reciclados, com elevada eficiência (MÜLLER, 2011). Segundo a autora, a separação de um resíduo com 10% de gesso em massa gerou cerca de 90% de agregados descontaminados.

Na Região Metropolitana de São Paulo, a areia natural chega a custar R\$ 80/m³, enquanto a brita, cerca de R\$ 40/m³, apesar da relativa disponibilidade desses recursos minerais. O preço é bastante onerado pelo transporte, que representa até dois terços do valor desses bens (LA SERNA; REZENDE, 2009), ultrapassando em algumas regiões os preços de alguns locais dos Estados Unidos e da Europa Oriental (JOHN; ANGULO, 2013), o que demonstra que os desafios nacionais são tão importantes quanto os de outros países.

Pode-se concluir por essa análise que, num futuro próximo, o uso de materiais alternativos na construção, tal como os agregados reciclados obtidos a partir do processamento de RCD, deve tornar-se mais notório, assim como devem ser incentivadas tecnologias capazes de melhorar as características do produto para uso em concreto.

Assim, esse artigo tem por objetivo analisar os produtos resultantes da separação óptica de agregados reciclados de RCD mistos, com foco na remoção da cerâmica vermelha e na consequente redução da porosidade, para uso dos agregados reciclados em concreto.

Foram produzidos agregados puros de concreto e de cerâmica vermelha na Alemanha, com materiais locais e compostos em laboratório. Foram elaboradas três misturas entre esses agregados, com diferentes proporções de cerâmica vermelha, e, em seguida, submetidos a testes de separação óptica, para análise de eficiência desse processo industrial.

A partir da separação por densidade dos agregados produzidos em laboratório, o efeito da remoção da cerâmica vermelha (obtida pela separação óptica) foi discutido em termos da qualidade esperada desses agregados reciclados.

² Jigae é um equipamento de separação densitária muito utilizado na indústria mineral.

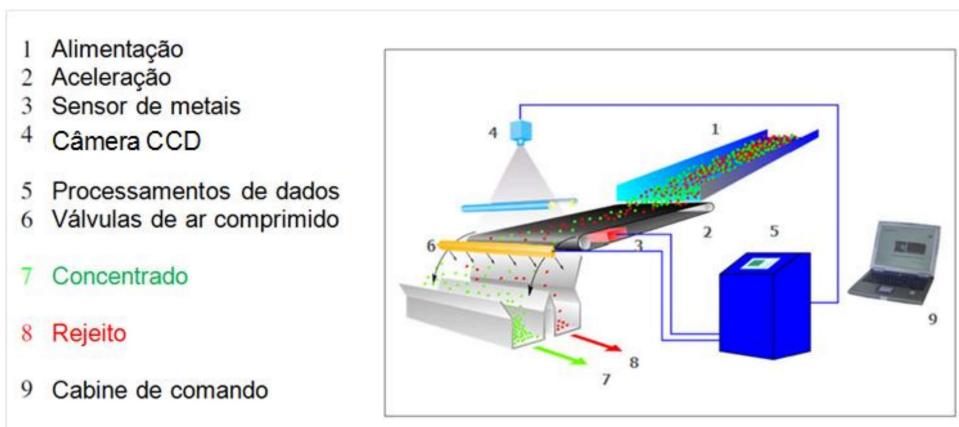


Figura 1 - Descrição do funcionamento do equipamento de separação óptica (por cor)

Fonte: Mulder, De Jong e Feenstra (2007).

Dados de caracterização de agregados de RCD mistos obtidos em diferentes cidades brasileiras (Santo André, São Paulo, Vinhedo e Macaé) e em outros países (Alemanha e Espanha) foram adicionados a essa análise, para discutir o efeito da separação óptica na qualidade de agregados obtidos por usinas de reciclagem reais.

Finalmente, o aumento na resistência à compressão do concreto causado pela redução do teor de cerâmica vermelha (e da absorção de água) dos agregados de RCD mistos foi discutido, com base em alguns estudos experimentais brasileiros (BAZUCO, 1999; PASSOS; PINTO JUNIOR; RAMOS, 2009; ZORDAN, 1997). Assim, foi possível indicar uma classe de resistência de concreto possível de ser produzida com esse agregado triado, de qualidade melhorada.

Materiais e métodos

Separação óptica da cerâmica vermelha e medida de eficiência do processo

O experimento foi realizado com o equipamento de separação óptica Autosort, modelo 1000³, com sensor de cor (espectro visível), 10 bits/pixel, resolução de 0,6 mm/pixel, disponível na unidade de teste das empresas associadas CommoDaS/TOMRA/Titech⁴, em Wedel, Alemanha.

Resíduos puros de concreto e de cerâmica vermelha foram gerados em laboratório e britados separadamente em Weimar, Alemanha. Os resíduos britados foram então peneirados entre a peneira 4 mm e a 32 mm, originando agregados

graúdos reciclados de concreto (ACO) e agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha (ACV) respectivamente. Amostras de agregados reciclados de RCD mistos foram compostas com proporções crescentes de cerâmica vermelha: 17%, 38% e 89% em massa.

As três amostras foram umidificadas previamente com água, para aumentar o contraste da cor, antes de passar pela etapa de detecção no equipamento. Nesse equipamento, uma câmera CCD (dispositivo de carga acoplada) obtém a imagem dos agregados e realiza, por um programa, o processo de segmentação baseado nos parâmetros vetoriais de cor (em três dimensões). Em seguida, as partículas segmentadas por cor são identificadas, e um comando mecânico dispara jatos de ar estratégicamente posicionados, quando as partículas do material estão em queda livre, ao final do transportador de correia. As partículas segmentadas são então redirecionadas para um contêiner, enquanto as demais continuam, em queda livre, para outro contêiner.

Para avaliar a eficiência de separação, ao final do processamento, as três amostras separadas por cor foram armazenadas e posteriormente caracterizadas quanto à composição, por separação manual das fases (catação), para determinação dos teores de cerâmica vermelha e concreto presente nos agregados de RCD mistos. Estabeleceu-se uma correlação entre a pureza do produto (% concreto recuperado), com base no teor de cerâmica vermelha presente na alimentação.

Separação densitária e análise da remoção da cerâmica vermelha

Para discutir o efeito da remoção da cerâmica vermelha na qualidade esperada dos agregados, os

³ Para mais informações, acessar <<http://www.titech.com>>.

⁴ Para mais informações, acessar <<http://www.tomrasorting.com/>>.

agregados puros de concreto (ACO) e de cerâmica vermelha (ACV) foram submetidos à separação sequencial por densidade⁵, pelo procedimento afunda-flutua (*sink and float*) (BURT, 1984), empregando-se solução aquosa de SPT (*Sodium Polytungstate*), em soluções com densidades fixas, variando entre 1,9 e $2,7 \pm 0,1 \text{ kg/dm}^3$. Para cada tipo de agregado, as massas específicas aparentes⁶ dos sete produtos de densidade obtidos para cada amostra foram avaliadas com o equipamento Geopyc 1360, da Micromeritics, que determina, por meio de sólidos ultrafinos, o volume aparente (envelope) das partículas (WEBB; ORR, 1997). Foram realizados, portanto, 14 ensaios. Para cada tipo de agregado, uma distribuição de massa de partículas, de acordo com os valores de massa específica aparente⁷ foi elaborada. Com base nas composições das três misturas propostas no item anterior, as distribuições de valores de massa específica aparente foram discutidas, antes e depois da separação óptica.

Coleta e análise de dados de caracterização de agregados de RCD mistos

Para discutir o efeito da separação óptica na qualidade esperada dos agregados de RCD mistos reciclados reais, foram utilizados dados preliminares de alguns estudos de caracterização.

Os dados de caracterização relativos a Santo André (SP) foram obtidos a partir de 36 amostras (~5 kg/cada) de agregados graúdos de RCD mistos reciclados (entre 4,8 mm e 12,5 mm); 3 amostras/dia, durante 12 dias. As 36 amostras foram separadas manualmente em fase cimentícia (cimento e rocha) e fase cerâmica vermelha, gerando 72 subamostras, que foram caracterizadas quanto à absorção de água e massa específica aparente (ANGULO; JOHN, 2004). A massa específica aparente e a absorção de água dessas subamostras foram determinadas de acordo com a norma NM 53 (MERCOSUL..., 2002). Foram estabelecidas distribuições de valores de absorção de água e massa específica aparente com base no número de partículas com a referida propriedade.

Os dados de caracterização relativos a São Paulo e Vinhedo foram obtidos a partir de três amostras médias representativas de agregados de RCD

mistas (2 toneladas cada), coletadas nas usinas públicas de reciclagem de São Paulo e Vinhedo, ambas localizadas no Estado de São Paulo, também após 20 dias de produção (ANGULO, 2005). Cada amostra foi homogeneizada e amostrada por meio de pilha horizontal alongada para a obtenção de alíquotas de aproximadamente 10 kg. A subamostra foi, então, peneirada em quatro frações granulométricas (de 25,4 mm a 19,1 mm; de 19,1 mm a 12,7 mm; de 12,7 mm a 9,5 mm; e de 9,5 mm a 4,8 mm). Cada fração granulométrica foi submetida à separação sequencial por densidade, pelo procedimento afunda-flutua (*sink and float*), em soluções com densidades fixas. As soluções de cloreto de zinco com água foram utilizadas para obterem-se as densidades de 1,7 e 1,9 kg/dm³. As soluções de bromofórmio com álcool etílico foram utilizadas para obterem-se as densidades de 2,2 e 2,5 kg/dm³. Foram gerados 60 produtos de densidade (cinco produtos de densidade/fração granulométrica x quatro frações granulométrica /amostra x três amostras). Os produtos separados por densidade passaram por catação, separando-os entre partículas cimentícias, de cerâmica vermelha, de rocha, entre outros. A massa específica aparente e a absorção de água das fases principais dos produtos de densidade (~60 fases cimentícias; ~25 fases de cerâmica vermelha) foram avaliadas pela norma NM 53 (MERCOSUL..., 2002), permitindo construir, em seguida, distribuições de valores de absorção de água e massa específica aparente, com base no número de partículas.

Para estabelecer-se uma relação entre a porosidade (avaliada indiretamente pela absorção de água, segundo o método descrito acima) e o teor de cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos, foram utilizados os resultados das 36 amostras de Santo André. Para calcular a absorção de água dos agregados, realizou-se uma ponderação entre a massa e a respectiva absorção de água de cada fase constituinte do agregado. No caso de Vinhedo e de São Paulo, como só havia três amostras representativas de agregados, decidiu-se incluir também os resultados das quatro frações granulométricas/amostra, totalizando 12 resultados para cada propriedade (teor de cerâmica vermelha ou absorção de água). Nesse caso, o teor médio de cerâmica vermelha dos agregados foi calculado, por ponderação, entre a massa dos produtos de densidade e os respectivos teores em cada produto. Da mesma forma, a absorção de água média dos agregados foi calculada pela ponderação entre a massa dos produtos de densidade e os respectivos valores de absorção de água de cada produto. Para complementar os resultados e reforçar as evidências observadas, foram utilizados mais 36

⁵ A terminologia “densidade” foi intencionalmente empregada para identificar a solução utilizada no ensaio de separação por densidade, e para diferenciar da terminologia “massa específica”, empregada, neste estudo, para identificar essa mesma característica na partícula sólida.

⁶ Essa determinação é baseada no volume aparente, que inclui o volume de poros e o volume de sólidos. Assim, a massa específica aparente tem correlação com a absorção de água (DAMINELI, 2007).

resultados de determinação do teor de cerâmica vermelha, por catação, e de absorção de água, pelo método acima descrito, em agregados de RCD mistos, originados de um estudo de caracterização no município de Macaé, RJ. Cada resultado deste foi considerado representativo da fração graúda (entre 25 mm e 4,8 mm) existente em uma caçamba de cinco metros cúbicos de RCD misto amostrada (sem britagem) nessa região.

Dados internacionais foram utilizados para demonstrar o potencial de aplicação da técnica de separação óptica em outros países. Foram incluídos mais 20 resultados de caracterização (teor de cerâmica vermelha ou absorção de água), obtidos pelos estudos de Winkler (1995) e Kehr (2006). Tais resultados foram obtidos de sete diferentes usinas de reciclagem, localizados em diferentes localidades da Alemanha. Foram ainda somados mais 32 resultados de caracterização (teor de cerâmica vermelha ou absorção de água) levantados em usinas de reciclagem na Espanha, a partir do estudo de Agrela *et al.* (2011). Os ensaios de absorção de água foram realizados de acordo com as normas vigentes de cada país e não diferem significativamente do método brasileiro.

Coleta e análise de dados experimentais de concretos

Como o teor de cerâmica vermelha influenciou significativamente a porosidade dos agregados de RCD mistos (resultado a ser apresentado na Figura

7, item 3), foi analisado o aumento da resistência do concreto com a redução do teor de cerâmica vermelha do agregado de RCD misto, a partir de dados experimentais brasileiros (BAZUCO, 1999; PASSOS; PINTO JUNIOR; RAMOS, 2009; ZORDAN, 1997) (Tabela 2). Para permitir uma comparação, os resultados experimentais contendo diferentes teores de cerâmica vermelha foram agrupados, admitindo-se intervalos de valores para a relação unitária entre cimento e agregados (cimento/cimento: agregados/cimento – 1:m): um entre 1:3 e 1:4 e outro entre 1:4 e 1:5.

Resultados e discussões

Eficiência da remoção da cerâmica vermelha por separação óptica

A Figura 2 apresenta os resultados da separação óptica da cerâmica vermelha, por meio de diagramas de Sankey. Os subprodutos apresentaram mais de 90% de cerâmica vermelha, possuindo apenas rochas escuras que não foram detectadas sobre os transportadores de correia (Figura 3). Quanto maior o teor de cerâmica na alimentação, maior o teor de cerâmica vermelha nos subprodutos (Figura 4a), indicando que o sistema de segmentação das partículas de cerâmica vermelha é preciso (não menor que 91,5%) e pouco afetado pela quantidade de cerâmica vermelha presente na alimentação.

Tabela 2 - Resultados experimentais de concretos moldados com agregados de RCD

Teor de cerâmica vermelha no agregado (% kg/kg)	Traço unitário do concreto (1:m) (kg/kg)	Relação a/c do concreto (kg/kg)	Resistência à compressão média do concreto (MPa)	Fonte
0	1:3	nd	29,9	Bazuco (1999)
14,6		0,51	30	Zordan (1997)
25,9		0,55	24	
23,8		0,63	21	
18,9		0,64	24	
20	1:3,8	0,49	24,0	Passos, Pinto Junior e Ramos (2009)
40	1:3,5	0,50	21,8	
100	1:3	0,52	15,7	
0	1:5	nd	19,8	Bazuco (1999)
14,6		0,71	20	Zordan (1997)
25,9		0,79	18	
23,8		0,82	16	
18,9		0,82	18	
20	1:4,8	0,57	19,5	Passos, Pinto Junior e Ramos (2009)
40	1:4,5	0,70	16,4	
100	1:4,5	0,66	13,5	

Com relação aos produtos, o separador óptico tem alta eficiência para a remoção da cerâmica vermelha quando o teor de cerâmica vermelha na alimentação não ultrapassa 40%. Acima desse valor, a eficiência cai, resultando em até 21,2% de cerâmica vermelha no produto. A remoção torna-se menos eficiente quando a concentração cresce devido à provável deficiência dos jatos responsáveis pela separação, e não pelo sistema de segmentação de partículas. Por isso, o aumento no teor de cerâmica na alimentação influencia no aumento do teor de cerâmica vermelha nos produtos (Figura 4b). Aumentar a disponibilidade dos jatos de ar ou reduzir a velocidade dos transportadores de correia podem ser alternativas para melhorar a eficiência do processo.

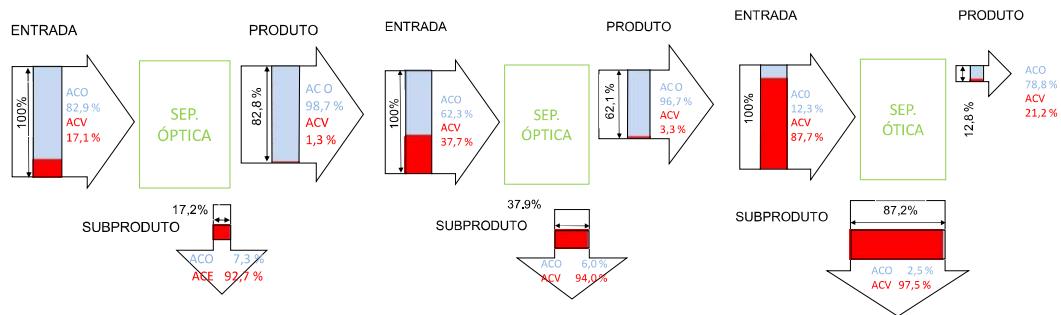


Figura 2 - Resultados de separação óptica da cerâmica vermelha das amostras

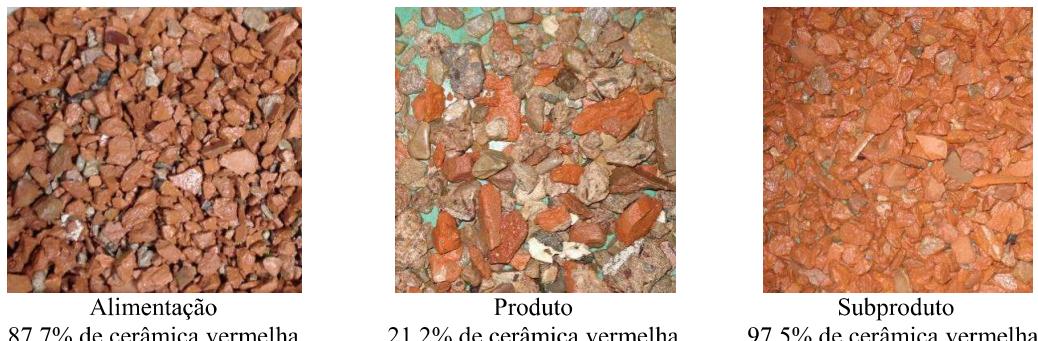


Figura 3 - Imagens da separação da amostra com alto teor de cerâmica vermelha

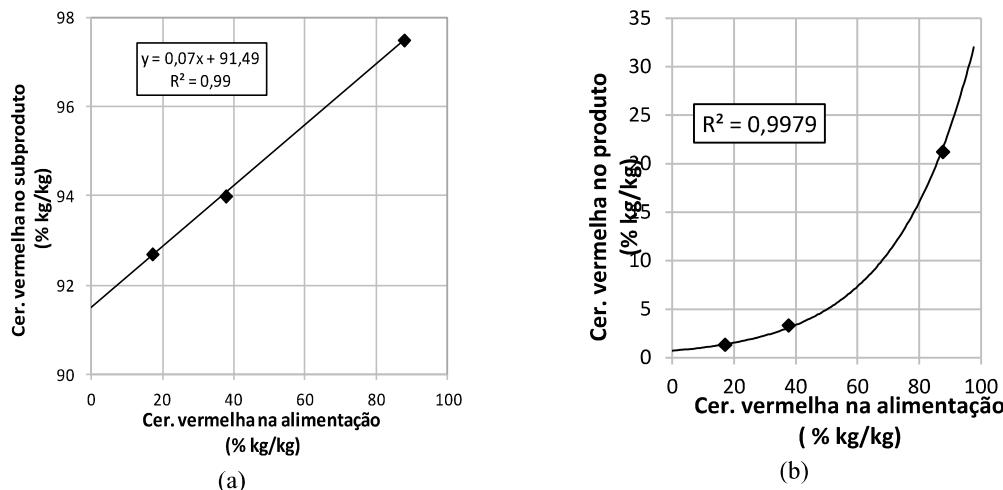


Figura 4 - Teores de cerâmica - subproduto x alimentação (a) e teores de cerâmica vermelha - produto x alimentação (b)

Efeito da remoção da cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos e sua influência no concreto

A Tabela 3 mostra a distribuição de massa específica aparente dos agregados puros de concreto e de cerâmica vermelha, bem como das amostras e produtos obtidos pela separação óptica. Os produtos 1 e 2 obtidos pela separação óptica possuem massa específica média similar à do resíduo de concreto, com menos de 5% de massa de partículas com massa específica abaixo de 2,0 kg/dm³. O produto 3 possui massa específica média ainda mais elevada (2,46 kg/dm³ – 3,5% inferior à do agregado do concreto), porém possui mais de 20% de massa de partículas com massa

específica abaixo de 2,0 kg/dm³, devido ao teor de cerâmica residual no produto (21%).

A Figura 5 apresenta a dispersão de resultados de massa específica aparente das partículas cimentícias/rochas e a das partículas de cerâmica vermelha dos agregados de RCD mistos, obtidas a partir de estudos representativos em três cidades brasileiras. A maior parte das partículas de cerâmica vermelha possui massa específica aparente abaixo de 1,9 kg/dm³, enquanto a maior parte das partículas cimentícias/rochas possui massa específica aparente acima de 2,0 kg/dm³. Destaca-se, porém, que pode existir até 20% da massa de partículas cimentícias com massa específica aparente abaixo de 2,0 kg/dm³, que não seriam potencialmente removidas por uso da separação óptica.

Tabela 3 - Distribuição da massa específica aparente das amostras e dos produtos obtidos pela separação óptica

Massa esp. aparente - MEA (kg/dm ³)	Massa dos produtos separados por densidade (% kg/kg)								Produto 3 da sep. óptica (79% ACO/ 21% ACV)
	Aggregado de concreto (ACO)	Aggregado de cerâmica vermelha (ACV)	Amostra 1 (83%ACO/ 17%ACV)	Produto 1 da sep. óptica (99%ACO/ 1%ACV)	Amostra 2(62%ACO/ 38%ACV)	Produto 2 da sep. óptica (97% ACO/ 3%ACV)	Amostra 3 (12%ACO/ 88%ACV)		
1,9	0,00	0,80	0,14	0,01	0,30	0,02	0,71	0,17	
2,1	2,82	72,23	14,62	3,51	29,20	4,90	64,59	17,40	
2,2	3,57	27,00	7,55	3,80	12,47	4,27	24,42	8,49	
2,4	23,14	0,00	19,21	22,91	14,35	22,45	2,55	18,28	
2,5	8,61	0,00	7,15	8,52	5,34	8,35	0,95	6,80	
2,6	28,01	0,00	23,25	27,73	17,37	27,17	3,08	22,13	
2,7	33,85	0,00	28,10	33,51	20,99	32,83	3,72	26,74	
Massa esp. aparente média (kg/dm ³)	2,55 (*)	2,13	2,48	2,55	2,39	2,54	2,17	2,46	

Nota: *MEA média=[(MEA₁xMassa₁ + MEA₂xMassa₂+....+MEA_nxMassa_n]/ (Massa₁+Massa₂+...+Massa_n)]

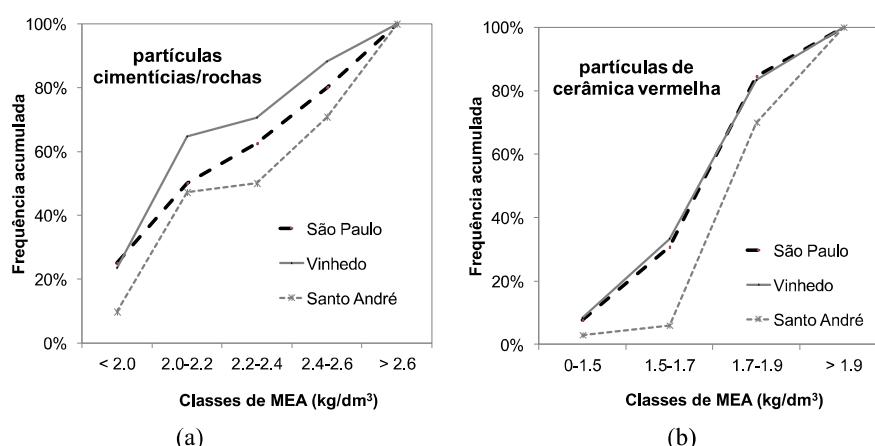


Figura 5 - Dispersão de massa específica aparente para as partículas cimentícias e as de cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos brasileiros

São também encontrados resultados distintos em termos de distribuição de valores de absorção de água entre as partículas cimentícias/rochas e as de cerâmica vermelha (Figura 6). Cerca de 90% da massa das partículas de cerâmica vermelha apresentam absorção de água maior que 14% kg/kg, e quase 100% da massa das partículas cimentícias/rochas possuem absorção de água menor que 15% kg/kg.

A massa específica aparente e a absorção de água são medidas afetadas pela porosidade das partículas. Quanto maior a absorção de água dos agregados, maior será a porosidade deles. Como os poros são incluídos na determinação do volume aparente, o aumento do volume implica uma redução no valor de massa específica aparente (massa/volume aparente).

As partículas de cerâmica vermelha são mais porosas que as partículas cimentícias presentes nos agregados de RCD mistos. Assim, quanto maior seu teor de cerâmica vermelha, maior será a

porosidade desses agregados. É por isso que a quantidade de cerâmica vermelha dos agregados de RCD mistos brasileiros influencia a absorção de água dos mesmos (Figura 7a), parâmetro fundamental associado à porosidade, que afeta o desempenho do concreto (ANGULO, 2005). Essa influência também é observada em agregados de RCD mistos obtidos na Espanha (AGRELA et al., 2011) e em agregados de alvenaria obtidos na Alemanha (WINKLER, 1995; KEHR, 2006) (Figura 7b).

Os agregados de RCD mistos, brasileiros ou do exterior, contêm geralmente até 50% de cerâmica vermelha em sua composição em massa. Isso implica que no produto será encontrado até 5% de cerâmica vermelha (Figura 4b), resultando em agregados de RCD com absorção de água entre 4% (dados da Espanha) e 7% (dados do Brasil e da Alemanha). Esse aumento da absorção de água é causado por partículas cimentícias porosas, com massa específica abaixo de 2,0 kg/dm³.

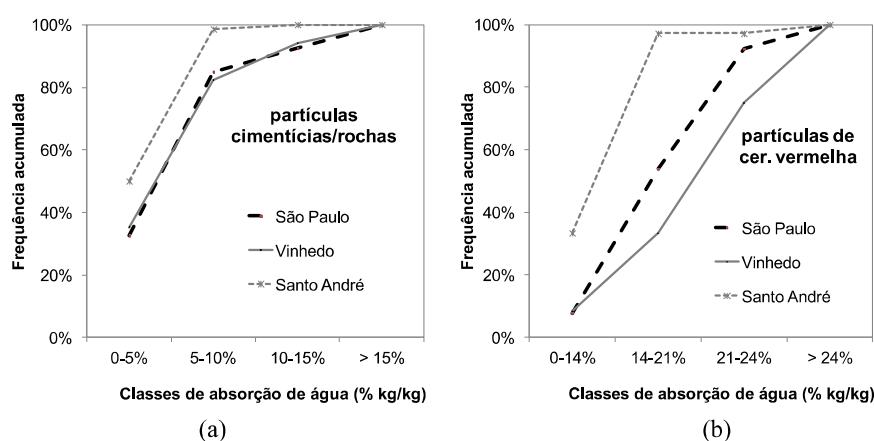


Figura 6 - Dispersão de absorção de água para as partículas cimentícias e as de cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos brasileiros

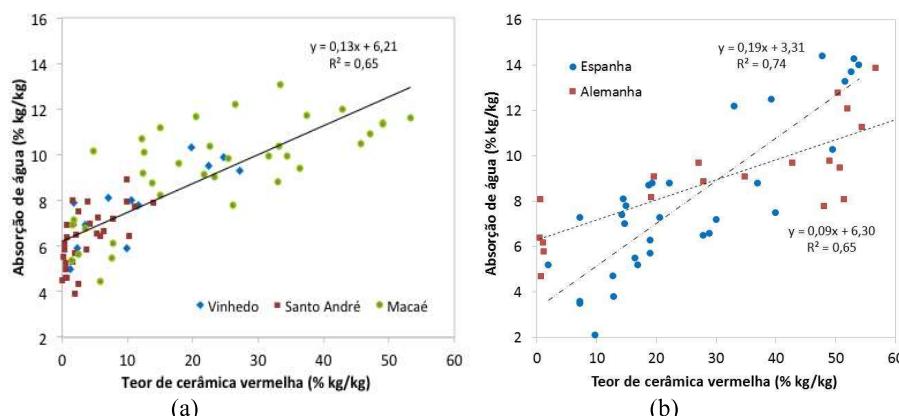


Figura 7 - Dispersão de absorção de água para as partículas cimentícias e as de cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos brasileiros

A distribuição de massa específica dos agregados de RCD mistos depende da fonte do resíduo. Amostras obtidas na cidade de Santo André são mais densas do que às obtidas em outras cidades brasileiras, resultado de maior concentração localizada de resíduo de concreto de obras públicas nessa usina de reciclagem e/ou britagem mais intensa (agregado com dimensão menor que 12 mm). Em Vinhedo, as amostras são menos densas, obtidas a partir de resíduos de casas térreas residenciais de alvenaria, que possuem pequena quantidade de estrutura de concreto armado. Essas particularidades afetam a viabilidade do uso da separação óptica, devido à maior ou menor concentração de partículas com massa específica abaixo de 2,0 kg/dm³. Independentemente da origem, a britagem intensiva, com ou sem tratamento térmico, é certamente uma alternativa para fragmentar essas partículas mais porosas (NAGATAKI *et al.*, 2004; SHIMA *et al.*, 2005), transformando-as em areias mais densas e compensando essa limitação da técnica.

A Figura 8 demonstra como a resistência do concreto aumenta quando o teor de cerâmica vermelha do agregado de RCD misto é reduzido, usando dados experimentais brasileiros (BAZUCO, 1999; PASSOS; PINTO JUNIOR; RAMOS, 2009; ZORDAN, 1997). Essa correlação

existe porque a redução do teor de cerâmica implica a redução da porosidade (absorção de água) desse tipo de agregado. Nessa demonstração, o agregado de RCD com 0% de cerâmica vermelha corresponde a um agregado reciclado puro de concreto. Após a separação óptica e admitindo-se teores de até 5% de cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos brasileiros, a produção de concretos com resistência à compressão entre 20 e 30 MPa (traços unitários em massa entre 1:3 e 1:5) torna-se viável.

Conclusões

A remoção da cerâmica vermelha dos agregados de RCD mistos, por separação óptica, possibilita a obtenção de um agregado reciclado composto essencialmente de concreto, cuja absorção de água varia entre 4% e 7%. A eficiência do equipamento depende do conteúdo de cerâmica vermelha presente no agregado de RCD misto (alimentação do processo). Teores de até 5% de cerâmica vermelha nos agregados de RCD mistos brasileiros são esperados. Nesse caso, a produção de concretos estruturais (20-30MPa) de uso corrente no mercado nacional com incorporação de agregados reciclados torna-se viável.

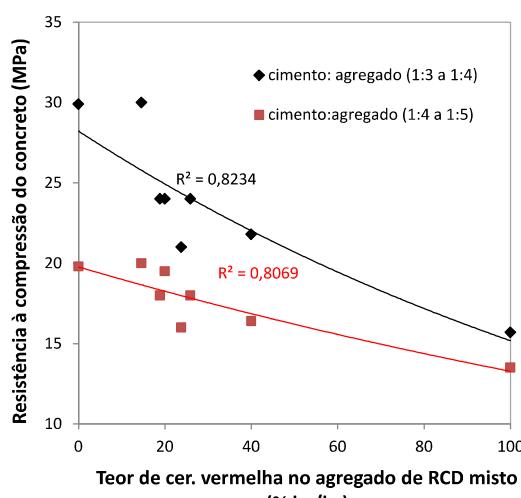


Figura 8 - Resistência à compressão do concreto x teor de cerâmica vermelha no agregado de RCD misto

Referências

- AGRELA, F. *et al.* Correlations Between Physical and Chemical Properties of Mixed Recycled Aggregates. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PROGRESS OF RECYCLING ON THE BUILT ENVIRONMENT, 2., Brasil, 2011.
- ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento Mecânico dos Concretos.** 149 f. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ANGULO, S. C. *et al.* On the Classification of Mixed Construction and Demolition Waste Aggregate by Porosity and Its Impact on the Mechanical Performance of Concrete. **Materials and Structures**, v. 43, n. 4, p. 519-528, 2010.
- ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Variabilidade dos Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados. **E-Mat**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:** agregados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004. 12 p.
- BAZUCO, R. S. **Utilização de Agregados Reciclados de Concreto Para Produção de Novos Concretos.** 123 f. Florianópolis, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- BUTTLER, A. M. **Concretos Com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto:** influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 199 f. São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- BURT, R.O. **Gravity Concentration Technology.** Elsevier: Amsterdam. 1984.
- DAMINELI, B. L. **Estudo de métodos para a caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** 125 f. São Paulo, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- DEHLER, M. Optical Sorting of Mineral Raw Materials. **Aufbereitungstechnik**, v. 44, n. 10. p. 38-42, 2003.
- DERKS, J. W. Wet processing of Demolition Rubble With Pulsator Jigs. **Aufbereitungstechnik**, v. 38, n. 3, p. 139-143, 1997.
- GÓMEZ-SOBERÓN, J. Porosity of Recycled Concrete With Substitution of Recycled Concrete Aggregate: an experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301-1311, 2002.
- HANSEN, T. C. (Ed.). **Recycling of Demolished Concrete and Masonry.** London: E&FN SPON, 1992. 305 p. Rilem report 6.
- JOHN, V. M. Materiais de Construção Civil e o Meio Ambiente. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Ibracon, 2007. p. 95-117.
- JOHN, V. M.; ANGULO, S. C. Sustainability and Recycling Construction Waste. In: **PROGRESS OF RECYCLING IN THE BUILT ENVIRONMENT:** final report oft he RILEM Technical Committee 217-PRE. Holanda: Springer, 2013. v. 8, p. 5-35.
- KEHR, K. **Untersuchungen zur Homogenität von Altbeton und Abbruchziegel.** Diplomarbeit – Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität, Weimar, 2006.
- LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados Para a Construção Civil.** Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009. Disponível em: <<http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/07/DNPM2009.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2013.
- LEITE, M. B. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição.** 270 f. Porto Alegre, 2001. 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.** 208 f. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

- LIMA, J. A. R. **Proposição de Diretrizes Para a Produção e Normalização de Resíduos de Construção Reciclados e de Suas Aplicações em Argamassas e Concretos.** 204 f. São Carlos, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- MIRANDA, F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.
- MULDER, E.; DE JONG, T. P. R.; FEENSTRA, L. Closed Cycle Construction: an integrated process for the separation and reuse of C&D waste. **Waste Management**, v. 27, n. 10, p. 1408-1415, 2007.
- MÜLLER, A. Recycling of Masonry Rubble: status and new utilization methods: part 1. **Ziegelindustrie International**, v. 56, p. 17-25, 2003.
- MÜLLER, A.; WIENKE, L. Measurements and Models for the Gravity Concentration of C&D Waste Through Jigging. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDING AND STRUCTURES, Barcelona, 2004. **Proceedings...** Barcelona, 2004.
- MÜLLER, A. Quality Parameters of Recycled Aggregates: conclusions under the aspects of the concrete technology and processing technology. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PROGRESS OF RECYCLING ON THE BUILT ENVIRONMENT, 2., São Paulo, 2011. **Proceedings...** São Paulo, 2011.
- NAGATAKI, S. et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p. 965-971, 2004.
- NORMA MERCOSUL. NM 53: agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.
- PASSOS, L.; PINTO JUNIOR, N. O.; RAMOS, M. F. Dosagem Experimental de Concretos de Resíduos Cerâmicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., Curitiba, 2009. **Anais...** Curitiba, 2009.
- 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**, v. 34, n. 1, p. 31-36, 2004.
- SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade.** Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2005. 603 p.
- SHIMA, H. et al. An Advanced Concrete Recycling Technology and Its Applicability Assessment Through Input-Output Analysis. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, n. 1, p. 53-67, 2005.
- ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho Como Agregado, na Confecção do Concreto.** 140 f. Campinas, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1997.
- WEBB, P. A.; ORR, C. **Analytical Methods in Fine Particle Technology.** Norcross: Micromeritics Instrument Corp. 1997. 301 p.
- 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**, v. 33, p. 403-408, 2000.
- WINKLER, A. **Eigenschaften von Mörteln und Betonen aus Ziegelrestmassen.** Weimar, 1995. Diplomarbeit – Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar, 1995.

Agradecimentos

S. C. Angulo agradece a bolsa de pós-doutorado no exterior concedida pelo CNPq – processo 200.959/2006-9. À Bauhaus Universität Weimar e à empresa Titech, que viabilizaram esta pesquisa. Ao Convênio FINEP 01.05.0100.00 - Aperfeiçoamento do processo de reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição, que possibilitou integrar resultados na análise deste artigo.

Revista Ambiente Construído
Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br