

LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
ROBERTO BLANCO TORRENS

I SEMANA IBERO-AMERICANA DE ENGENHARIA DE MINAS

SÃO PAULO, 9-13 DE AGOSTO DE 2004

I SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO
DE ENGENHARIA DE MINAS

I WORKSHOP EM RISCOS GEODINÂMICOS

XII REUNIÃO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO
IBERO-AMERICANA DE ENSINO SUPERIOR
DE ENGENHARIA DE MINAS

Apoio



Caracterização de resíduos de construção e demolição

C. Ulsen; H. Kahn

Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

S.C. Ângulo; V.M. John

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Civil

RESUMO: Atualmente a caracterização da composição dos agregados reciclados é feita na fonte de coleta, seguido de um processo simplificado de catação visual das partículas. O método é barato e simples, porém apresenta problemas referentes a reprodutibilidade da técnica, distinção visual entre partículas cimentícias de argamassas, de concretos e de materiais cerâmicos além da variabilidade de propriedades físicas de determinadas espécies minerais, impossibilitando a implantação de uma central de reciclagem massiva destes resíduos. No sentido de colaborar com o desenvolvimento sustentável na construção civil, a caracterização dos agregados tem como objetivo dar suporte à elaboração de uma usina de reciclagem.

Este artigo discute resultados parciais de uma caracterização tecnológica empregada em resíduos de construção e demolição. Introduz algumas informações ainda pouco conhecidas ou em desacordo com as práticas usualmente adotadas no mercado em face à falta de informações sobre tais produtos.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam entre 13 e 67% em massa dos resíduos sólidos urbanos em vários países, incluindo o Brasil [1]. A geração *per capita* de RCD em algumas cidades do Brasil é, em média, de 500 kg/ano [2]. Na cidade de São Paulo, esta geração atinge $5,5 \times 10^6$ t/ano, sendo que mais de 20% deste resíduo é depositado clandestinamente na malha urbana. O gerenciamento custa em torno de R\$ 45 x 10^6 /ano e causa esgotamento de aterros, assoreamento de rios, obstrução de galerias e bueiros, entre outros [2,3].

A motivação pela reciclagem mineral de RCD vem entre outros fatores da necessidade de [1,2] reduzir custos e impactos ambientais, reduzir a extração de recursos naturais, aumentar a sustentabilidade do setor de construções, porém esbarra-se em um impasse que é a ausência de um programa de demolição seletiva. Por falta de conhecimento das propriedades do agregado reciclado, grande parte deles são utilizados como base de pavimentação, porém esse setor não absorve todo o resíduo gerado; encoraja-se portanto o uso de agregados reciclados em concreto, para tal o controle da composição e algumas propriedades físicas é essencial. [4].

2 METODOLOGIA

Amostras representativas dos agregados de RCD reciclados foram coletadas em duas usinas de reciclagem situadas em diferentes cidades do estado de São Paulo: Itaquera (grande São Paulo) e Vinhedo (interior).

Os resíduos são classificados em dois diferentes tipos: cinza (com predominância de materiais à base de cimento) ou vermelho (com predominância de materiais cerâmicos vermelhos, solos e outros).

Os RCD's foram amostrados em pilha alongada, por 18 dias consecutivos de produção; coletaram-se os resíduos do tipo vermelho (tipo II) de ambas as centrais e o cinza (tipo I) de somente Itaquera. A características visuais destes resíduos são ilustradas nas fotografias 1 e 2.



Fotografia 1 – Resíduo tipo I

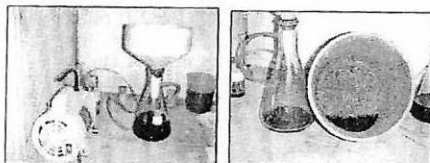


Fotografia 2 – Resíduo tipo II

As amostras foram peneiradas em peneiras em 25,4; 19,1; 12,7; 9,52; 4,76; 2,38; 1,19; 0,59 e 0,297 mm. As frações retidas na peneira de abertura 25,4 mm foram re-britadas em britador de mandíbula com abertura de mandíbula equivalente até que todo o material passasse nesta peneira. Em seguida, o material foi classificado nas mesmas peneiras e composto com as demais frações (< 25,4 mm).

Os agregados foram então compostos em frações +19,1; +12,7; +9,52; +4,76; +1,19 e +0,297 mm e separados por líquidos densos nas densidades de 1,7; 1,9; 2,2; e 2,5 kg/dm³, sendo utilizados cloreto de zinco em solução aquosa para as duas menores densidades e bromofórmio para as demais.

As fotografias 3 e 4 ilustram o ensaio realizado com bromofórmio em capela.



Fotografia 3 - Separação mineral em líquidos densos

Análises químicas e mineralógicas foram realizadas em cada fração a fim de avaliar a eficiência da separação mineral por líquidos densos como ferramenta de caracterização dos agregados. A análise química foi realizada por fluorescência de raios X (FRX) com análise dos teores dos onze óxidos totais mais abundantes: SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO, TiO₂, P₂O₅, SO₃, em espectrômetro MagixPro - PANalytical, a partir de pérolas fundidas com 1 g de amostra e 7 g de fundente. A caracterização mineral foi realizada por difração de raios-X através do método do pó mediante difratômetro MPD 1880, marca Philips. As amostras foram caracterizadas em função dos resultados de análise química e análise visual das espécies minerais.

Com as mesmas frações foram realizados ensaios físicos relevantes para agregados, entre eles absorção de água, densidade real e resistência à compressão uniaxial.

A absorção de água foi determinada através do método direto desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da EP-USP. Para o experimento, foi utilizada uma balança com saída serial RS-2, capaz de determinar massa submersa, conectada a um computador com um programa apto a efetuar leituras de massas em intervalos de tempos determinados. A absorção de água corresponde à diferença entre a massa submersa no instante final (após estabilização da curva) e no instante inicial, conforme a equação.

$$A(\%) = \frac{M_{s_{est}} - M_{s_{t=0}}}{M_{s_{t=0}}}$$

em que:

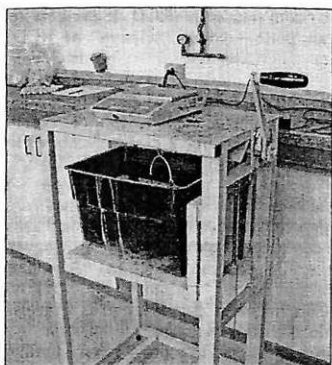
$A(\%)$ é a absorção de água das partículas, expressa em porcentagem.

$M_{s_{t=0}}$ é a massa submersa das partículas logo após imersão.

$M_{s_{est}}$ é a massa submersa das partículas após estabilização da curva absorção x tempo ($\Delta \leq 0,5\%$).

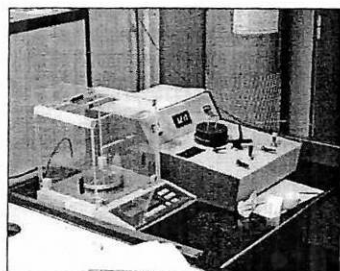
Esta determinação foi realizada para a fração graúda agregados de RCD reciclados das instalações de reciclagem de Itaquerá e Vinhedo. O método apresenta erro bastante expressivo para a fração miúda, razão pelo qual este não foi realizado nesta fração.

A balança utilizada para a realização do ensaio é apresentada na fotografia 4.



Fotografia 4 - Balança para determinação da massa submersa

A densidade real dos agregados foi determinada através de um picnômetro com intrusão de gás hélio, sendo esta uma técnica mais rápida e precisa que a picnometria com o emprego de líquidos. O equipamento utilizado foi de marca Quantachrome, modelo MUP-SOC, ilustrado a seguir.



Fotografia 5 - Picnômetro com intrusão de gás Hélio

O picnômetro a gás hélio tem como princípio medir o volume ocupado pelas partículas através da pressão de gás inserido na célula, segundo a equação $PV = nRT$, determinando a densidade real da amostra a partir da massa [5].

A resistência mecânica dos agregados foi avaliada por intervalo de densidade, a fim de avaliar a qualidade do agregado reciclado frente ao seu comportamento mecânico, verificar a relevância da classificação visual do RCD (vermelho e cinza), sua origem (Itaquera e Vinhedo) e a fração (gráudo / miúdo), também a aplicabilidade da concentração densitária.

De acordo com resultados anteriores [7] o aumento da densidade de corte no ensaio em líquidos densos indica uma melhoria na qualidade no

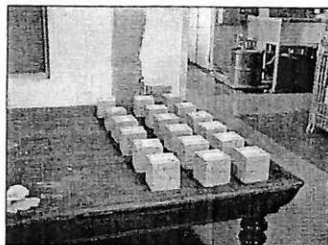
que diz respeito a uma série de parâmetros. Foram, portanto, confeccionados corpos de prova com agregados reciclados de $d > 1,9$; $d > 2,1$ e $d > 2,3$, de forma a possibilitar comparação entre as resistências observadas. Foi adotado um traço unitário em massa de 1:4,5 (cimento: agregados) com relação a/c (água/cimento) igual a 0,45, de modo que influência da porosidade das partículas dos agregados reciclados se torna mais significativa [6].

Os corpos-de-prova moldados são cúbicos de aresta 10 cm, curados em câmara úmida com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa maior ou igual a 95% durante 28 dias.

A forma na qual foram moldados os corpos de prova é ilustrada na Fotografia 6 e a seguir, na Fotografia 7 estão os corpos de prova após a secagem até atingir equilíbrio com temperatura ambiente



Fotografia 6 - Forma para molde dos CP



Fotografia 7 - Corpos-de-prova

3 RESULTADOS

3.1 Separação mineral por líquidos densos

A porcentagem de material flutuado em $1,9 \text{ g/cm}^3$ é muito pequena nos casos de Itaquera I e II, porém assume valores bastante significativos no caso do gráudo de Vinhedo II (diferença de procedência e características do resíduo - maior diversidade de fontes). Tais produtos ($d < 1,9 \text{ g/cm}^3$) não devem ser utilizados em razão da presença de resíduos não

minerais como plásticos, materiais betuminosos, madeira entre outros.

A figura 1 resume os resultados da distribuição em massa dos agregados graúdos e miúdos, respectivamente, a partir da separação em líquidos densos.

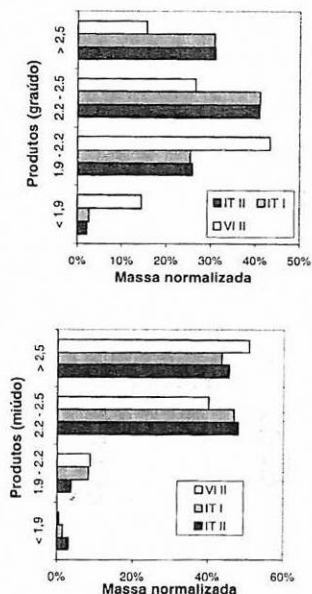
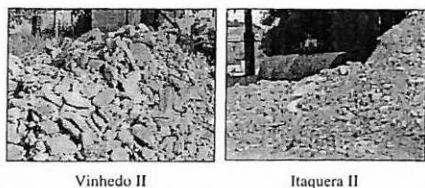


Figura 1 - Distribuição em massa dos agregados graúdos e miúdos.

Os produtos da separabilidade (tipo II) não são iguais, apesar de apresentarem aspectos visuais bem semelhantes - Fotografia 8.



Vinhedo II

Itaquera II

Fotografia 8 - Foto dos produtos tipo II das duas centrais

Existe distribuição diferenciada entre os produtos do tipo II, sendo que o RCD de Vinhedo (cidade de pequeno porte) é de pior qualidade para o uso em

concretos com relação ao RCD de Itaquera (cidade de grande porte - coleta "seletiva" de RCD's). É importante destacar que o RCD de Vinhedo é originado de demolição de edificações residenciais enquanto que o RCD de Itaquera predominantemente de demolições industriais. Logo, segundo esse parâmetro, a classificação visual não se justifica.

Os agregados miúdos apresentam maior participação de frações com densidade acima de 2,2 kg/dm³, se comparados com os graúdos. Este fato é independente da origem (Vinhedo ou Itaquera) ou classificação (vermelho ou cinza). A cominuição transforma poros internos em rugosidades superficiais, reduz as partículas mais friáveis a pó, liberando as partículas minerais, com areia. Conclui-se, portanto, que pode haver significativas diferenças regionais entre os agregados produzidos e que a classificação em vermelho e cinza nem sempre é relevante.

3.2 Análises químicas nos produtos de separações em líquidos densos

A análise foi realizada para os 10 elementos, porém estão aqui sumariados apenas os resultados referentes aos óxidos mais abundantes: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO.

- Para as três amostras estudadas os teores de SiO₂ mais elevados estão compreendidos na faixa de densidades superior a 2,5 g/cm³ seguido pela faixa de 2,2 a 2,5 g/cm³.
- Em relação aos teores de Al₂O₃ verificam-se comportamentos distintos entre as três amostras estudadas. Para o RCD de Itaquera, tipo I, com teor médio de 8,6% de Al₂O₃ nota-se enriquecimento para os produtos de maior densidade; já para o tipo II (10,4% Al₂O₃) têm-se teores mais elevados nas densidades extremas. O RC de Vinhedo, Tipo II, em média apresenta teores mais elevados de Al₂O₃ para os produtos de densidade entre 1,9 e 2,2, sendo que neste nota-se um significativo enriquecimento para as frações mais finas.
- Para o Fe₂O₃ verifica-se, em geral, pouca diferença de teores para as faixas de densidades analisadas.
- Para o CaO verifica-se comportamento semelhante para os RCD's tipo I de Itaquera e II de Vinhedo com os maiores teores associados aos produtos de menor densidade, além de sensível redução dos valores destes para as faixas de maiores densidades. Itaquera II, por sua vez, mostra enriquecimento de CaO nos produtos de densidades extremas.

3.3 Análise Mineralógica

As frações de densidade inferior a 1,9 g/cm³ são basicamente constituídas por partículas não minerais, contaminantes como películas de tintas, madeiras, papel e material betuminoso. Nesse caso não cabe caracterização química por FRX tampouco a difração de raios X.

As espécies minerais contidas nos intervalos de separação 1,9 < d < 2,2 e 2,2 < d < 2,5 kg/dm³ possuem correlações semelhantes para os teores de óxidos totais principais. A caracterização mineral indica a presença de diferentes tipos de silicatos como os tectosilicatos e filossilicatos (originados da cerâmica vermelha, de solos entre outros) e carbonatos (originados dos compostos à base de cimento), ver Tabela 1.

Tabela 1 - Fases minerais presentes nos agregados de RCD reciclados (1,9 < d < 2,5 kg/dm³)

It cinza gráudo	Sílica, Microclínio, Calcita, Dolomita (pp), Muscovita (pp)
It cinza miúdo	Sílica, Microclínio, Albita, Calcita, Muscovita (pp)
It vermelho gráudo	Sílica, Microclínio, Albita, Calcita, Muscovita (pp)
It vermelho miúdo	Sílica, Microclínio, Albita, Calcita, Muscovita (pp)
V vermelho gráudo	Sílica, Microclínio, Calcita, Ilita
V vermelho miúdo	Sílica, Microclínio, Calcita, Muscovita

A caracterização das espécies minerais contidas no intervalo de densidade d > 2,5 kg/dm³ indica a presença predominante de tectosilicatos presentes nos agregados naturais como quartzo e basalto e nas rochas naturais utilizadas na construção civil – Tabela 2.

Tabela 2 - Fases minerais presentes nos agregados de RCD reciclados (d > 2,5 kg/dm³)

It cinza gráudo	Sílica, Albita, Microclínio, Biotita, Flogopita
It cinza miúdo	Sílica, Albita, Microclínio, Biotita
It vermelho gráudo	Sílica, Albita, Microclínio, Antigorita (pp), Calcita, Muscovita (pp)
It vermelho miúdo	Sílica, Albita, Microclínio, Antigorita (pp), Calcita, Muscovita (pp)
V vermelho gráudo	Sílica, Albita, Microclínio, Clinocloro, Muscovita (pp)
V vermelho miúdo	Sílica, Albita, Microclínio, Clorita, Muscovita (pp)

3.4 Densidade real e absorção de água

A influência da densidade na absorção de água é relacionada na Figura 2.

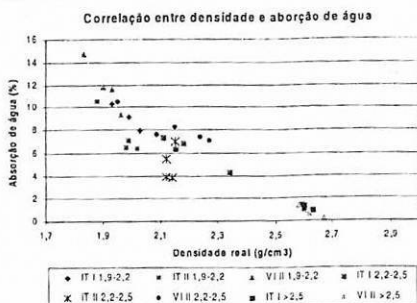


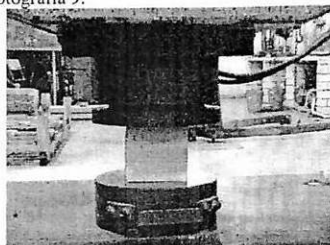
Figura 2 – Correlação entre a absorção de água e a densidade do agregado

Nota-se uma íntima correlação entre a densidade real dos agregados e a sua absorção de água, comprovando que a absorção se dá em função da porosidade dos mesmos.

Os resultados de massa específica aparente e de massa específica real são semelhantes para os produtos gráudos e miúdos, também a absorção de água é similar. Dessa forma os produtos miúdos são de melhor qualidade que os gráudos com relação a estes parâmetros físicos. Esta conclusão é contrária ao que se veicula no meio técnico → “o uso da fração miúda como agregados para concretos é pouco encorajado em função da baixa qualidade dos agregados (alta absorção de água e altos teores de contaminação)” [6,8].

3.5 Resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão dos agregados foi determinada em prensa simples, conforme ilustrado na Fotografia 9.



Fotografia 9 – Prensa de compressão uniaxial

Os resultados do ensaio acima mencionado estão resumidos na Figura 3.

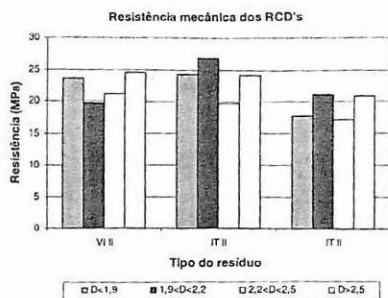


Figura 3 – Resultado do ensaio de resistência à compressão uniaxial

Diferentemente do que se esperava, os resultados mostram que independentemente da sua classificação visual, origem e densidade, os agregados apresentam resistências mecânicas muito próximas, o que indica que ou os agregados realmente são semelhantes ou o método densitário é pouco eficiente para separar os agregados por suas qualidades.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta resultados de grande interesse ao mercado de agregados, bem como contribui positivamente com o setor.

Estão aqui sumariados alguns dos resultados de maior relevância obtidos durante a pesquisa. Os mais expressivos referem-se principalmente à diferenciação dos RCD's em vermelho e cinza, e a caracterização de suas propriedades frente à densidade.

São aqui listadas algumas importantes conclusões:

- A separação por líquidos densos se revelou técnica importante no estudo dos agregados de RCD reciclados, uma vez que ela permite a separação de partículas com diferentes porosidades e mineralogia diferenciada. Este método apresenta grande potencial para ser um controle de qualidade mais rápido e pode ser combinado com catação ou análise de imagem com grandes ganhos de velocidade e de quantidade de informação.
- Os agregados graúdos de origens diversas quando separados por faixas de densidades apresentam distribuição de massa distinta. Neste experimento, os agregados reciclados em Vinhedo apresentaram menor frequência de produtos com densidades altas que os gerados em Itaquera.

- A classificação de RCD's em cinza, tipo I, e vermelho, tipo II, pode não ser significativa em termos de variação de porosidade e, potencialmente, de resistência mecânica dos agregados.
- Os agregados miúdos apresentam na média maior valor de massa específica aparente, e portanto tendem a ser mais resistentes que os agregados graúdos;
- O produto flutuado em $1,9 \text{ kg/dm}^3$ concentrou quase a totalidade dos contaminantes, como madeiras, papel e materiais betuminosos;
- Agregados com densidade acima de $2,5 \text{ g/cm}^3$ são predominantemente constituídos por fragmentos de rochas ou agregados naturais, envolvidos por uma camada de pasta de cimento endurecida.
- Agregados com densidade entre $1,9$ e $2,5 \text{ g/cm}^3$ são compostos predominantemente por cerâmicas (vermelha e branca).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil – Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 102p.
- [2] PINTO, T. P. *Recycling in construction sites: environmental responsibility and cost reduction*. In: CIB Symp Construction and environment: theory into practice. São Paulo, Brazil, 2000.
- [3] SCHNEIDER, D. M. *Transporte de resíduos de construção e demolição na cidade de São Paulo*. Exame de qualificação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002. 22p.
- [4] ANGULO, S.C. *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [5] RILEM RECOMENDATION. *Specification for Concrete with Recycled Aggregates. Materials and Structures*. n.27, p.577-9, 1994.
- [6] ZORDAM, S.E. *A Utilização do Entulho como Agregado na Confeção do Concreto*. Campinas, 1997. 140p. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.
- [7] Ulsen, C. *Caracterização Tecnológica de Resíduos de Construção e Demolição*. São Paulo, 2004. Relatório de Iniciação Científica. FAPESP. Escola Politécnica da USP.
- [8] LEITE, M.B. *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*. Porto Alegre, 2001. 290p. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.