



## **CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS SEPARADOS POR LÍQUIDOS DENSOS**

**Sérgio C. Angulo (1); Vanderley M. John (1); Carina Ulsen (2); Henrique Kahn (2)**

(1) Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – e-mail: [sergio.angulo@poli.usp.br](mailto:sergio.angulo@poli.usp.br)

(2) Departamento de Engenharia de Minas e do Petróleo, Escola Politécnica – Universidade de São Paulo

### **RESUMO**

Entre aos desafios para a expansão de mercado da reciclagem do resíduo de construção e demolição (RCD) mineral, encontra-se viabilizar o uso dos agregados reciclados em concretos. Existem dificuldades nacionais e internacionais em se adequar à triagem do RCD, atender às especificações dos agregados reciclados e encontrar métodos de caracterização adequados. A caracterização da composição dos agregados reciclados é normalmente realizada pela triagem na fonte, seguido de um processo simplificado de catação visual das partículas. Apesar do método ser barato e simples, ele apresenta alguns problemas: a) reprodução da técnica, b) distinção entre partículas cimentícias de argamassas e de concretos, c) variabilidade de propriedades físicas de determinadas espécies minerais (p. ex. partículas de cerâmica) e d) impossibilidade de se caracterizar agregados miúdos. O objetivo deste artigo foi investigar se a técnica de separação mineral por líquidos densos é eficiente para classificar as espécies minerais presentes nos agregados reciclados do ponto de vista químico e mineral. Como resultados, a técnica se revelou importante no estudo dos agregados de RCD reciclados, uma vez que ela permite a separação de partículas com diferentes porosidades e mineralogia diferenciada de forma mais rápida que a catação. O teor de solúveis em ácido revela o teor de pasta de cimento hidratada. Este teor tem relação com a massa específica das partículas. Os agregados graúdos de origens diversas quando separados por faixas de densidades apresentam distribuição de massa distinta. A classificação em vermelho e cinza pode não ser significativa em termos de variação de porosidade e, potencialmente, de resistência mecânica dos agregados. O produto flutuado em 1,9 kg/dm<sup>3</sup> concentrou quase a totalidade dos contaminantes, como madeiras, papel e materiais betuminosos. Agregados com densidade acima de 2,5 kg/dm<sup>3</sup> são predominantemente rochas naturais, envolvidas por uma camada de pasta de cimento endurecida, sendo que o teor de pasta endurecida é relativamente baixo. Agregados com densidade variando entre 1,9 e 2,5 kg/dm<sup>3</sup> são compostos predominantemente por cerâmicas (vermelha e branca) e partículas cimentícias, de teor de pasta superior ao de partículas mais densas. Quanto menor a massa específica aparente da partícula maior o teor de pasta de cimento, que pode ser analisada em regiões onde não se empregam agregados calcários pelo teor de solúveis em ácido.

Palavras-chave: caracterização; agregados reciclados, líquidos densos, controle de qualidade

### **1. INTRODUÇÃO**

#### **1.1 Gerenciamento e reciclagem de resíduos de construção e demolição**

O setor da construção civil é responsável por diversos impactos ambientais tais como uso intenso de recursos naturais não-renováveis e grande geração de resíduos sólidos (John, 2000). Estes resíduos sólidos, denominados como resíduos de construção e demolição (RCD), representam em torno de 50% em massa dos resíduos sólidos urbanos. Como a geração de RCD *per capita* em cidades de médio e grande porte está, em média, em torno de 500 kg/hab.ano (Pinto, 1999), pode-se estimar um montante

de  $68,5 \times 10^6$  ton RCD/ano visto que, no Brasil, 137 milhões de pessoas vivem no meio urbano.

A experiência nacional e internacional mostra que quando não existe política municipal moderna para os RCD, uma fração significativa deles é depositada ilegalmente na malha urbana gerando altos custos sócio-econômicos, assoreamento de rios, entupimento de bueiros, degradação de áreas urbanas entre outros (Pinto, 1999). Diante da massa de RCD na malha urbana, a autoridade municipal adota a solução de realizar a limpeza repetida das áreas de deposição ilegal e, via de regra, a multa é a única política preventiva adotada (Pinto, 1999; Symonds, 1999; EC, 2000). A fração que é destinada a aterros colabora significativamente para esgotamento de áreas de aterros em cidades de médio e grande porte (Symonds, 1999; EC, 2000).

Muitos países investem num sistema formal de gerenciamento do RCD como Holanda, Reino Unido entre outros países europeus (Hendriks, 2000; EC, 2000; Hobbs; Hurley, 2001). Estes sistemas visam reduzir a atratividade da disposição ilegal, principalmente via redução das distâncias de transportes do RCD. O Brasil segue a mesma tendência sendo que, segundo proposta de Pinto (1999), este sistema deve ser composto por: a) rede de pontos de coleta para pequenos geradores e grandes geradores posicionados estrategicamente para tornar a deposição pouco atrativa, b) companhias licenciadas para transporte e c) reciclagem do RCD. Esta foi a visão adotada na resolução CONAMA nº 307 de julho de 2002. Esta resolução atribui responsabilidades aos geradores, transportadores e gestores públicos do RCD. 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. Os RCD são classificados em quatro classes, de acordo com as possibilidades de reciclagem (A, reciclados como agregados; B recicláveis em outras cadeias como os plásticos e C sem tecnologia de reciclagem economicamente viável) ou periculosidade dos resíduos (Classe D). A *Classe A* é composta por materiais minerais como concretos, argamassas, tijolos e telhas cerâmicas, rochas naturais, solos entre outros (CONAMA, 2002) e representa a maior fração dos resíduos gerados.

Atualmente, no Brasil, existe em torno de 12 instalações de reciclagem de RCD classe A públicas e algumas privadas com escala de produção pequena (menor que 100 toneladas de RCD processado/dia) (Angulo *et al.*, 2003a). Não há reciclagem massiva no Brasil. O produto principal desta reciclagem é o agregado reciclado, destinado para usos como taludes, concretos magros de fundações, atividades de pavimentação entre outros.

Apesar da reciclagem de RCD *classe A* ser uma atividade bem antiga na Europa, a média de reciclagem ou reutilização no continente é de apenas 25% do gerado. De fato, na Europa, existem países com alto índice de reciclagem do RCD classe A e outros com reciclagem quase incipiente como Portugal e Espanha (EC, 2000). Mesmo em países europeus como Holanda, Dinamarca, Alemanha que conseguiram atingir altas taxas de reciclagem do RCD, os agregados reciclados são absorvidos em grande parte pelas atividades de pavimentação (Collins, 1997; Ancia *et al.*, 1999; Hendriks, 2000). Esta prática é conhecida como *downcycling*; ou seja, empregar produtos de maior qualidade e valor agregado em aplicações, quando reciclados, de menor qualidade e de menor valor agregado (Kohler; Penzel, 1997).

Existe uma tendência de saturação dos mercados usuais da reciclagem do RCD classe A (Mulder *et al.*, 2003). Como a proibição do uso de RCD reciclável em aterros sanitários é uma tendência em diversos países (Hendriks, 2000; EC, 2000) inclusive no Brasil (CONAMA, 2002), existe necessidade de expansão do mercado da reciclagem incluindo o desenvolvimento de novos usos (Mulder *et al.*, 2003).

O uso de agregados de RCD reciclados em produtos a base de cimento é altamente recomendado para se atingir reciclagem massiva (Angulo *et al.*, 2002). Sabe-se que para agregados com qualidade controlada a utilização em concreto é viável tecnicamente (Hansen, 1992; Zordan, 1997; Hendriks, 2000).

## **1.2 Uso dos agregados de RCD reciclados em concretos**

### **1.2.1 Dificuldades na triagem do RCD**

A normalização holandesa incluindo a especificação internacional Européia para uso dos agregados de

RCD reciclados em concretos requer triagem do RCD Classe A antes do processamento na usina de reciclagem (Rilem Recommendation, 1994; Hendriks, 2000). Neste caso, o RCD Classe A deve ser classificado como resíduos de concreto, de alvenaria e mistos.

Entretanto, mesmo na Holanda, apenas 1% do mercado de empresas de demolição empregam a demolição seletiva que separa a fração concreto estrutural das demais fases, permitindo a produção de agregados reciclados que de acordo com a normalização vigente nestes países pode ser utilizados na produção de concretos estruturais (Kowalczyk *et al.*, 2002). Conseqüentemente, o uso de agregados de RCD reciclados em concretos ainda é modesto (Hendriks, 2000).

No Brasil, como não existe ainda preocupação com demolição seletiva e boa parte dos resíduos é gerada na fase de construção, o agregado reciclado produzido é normalmente misto, ou seja, uma mistura de concretos, cerâmicas, rochas naturais, entre outros sendo que cada uma destas fases possui características muito variáveis. Nas usinas de reciclagem de RCD classe A, a única triagem visual é classificar o RCD como cinza (predominantemente resíduos à base de cimento) e vermelho (predominantemente resíduos cerâmicos, solos etc) (Figura 1).



(a)



(b)

**Figura 1 RCD cinza (a) e vermelho (b) triados na usina de reciclagem de Vinhedo/SP.**

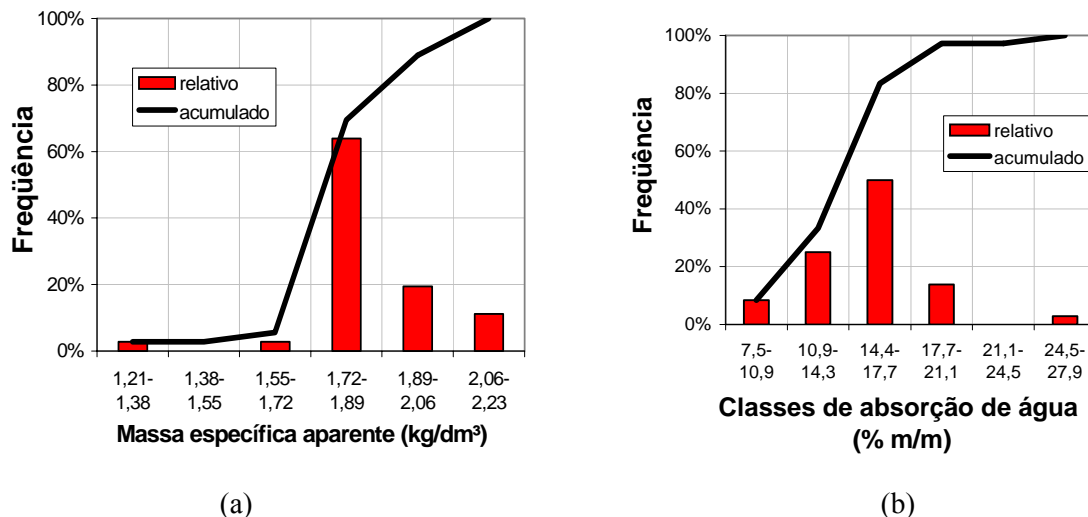
Esta classificação do RCD Classe A em cinza e vermelho tem se mostrado pouco eficiente para diferenciar as propriedades físicas dos agregados reciclados como absorção de água e massa específica aparente (Angulo *et al.*, 2003b). Estas propriedades físicas são fundamentais para definir a resistência mecânica dos agregados e, conseqüentemente do concreto com eles produzidos. Possivelmente também afetam a durabilidade do concreto, governada pela porosidade (Mehta; Monteiro, 1994).

### 1.2.2 Atendimento a especificações internacionais

Quase todas as normas e especificações de agregados de RCD reciclados existentes, impõem limites máximos de presença de fases que não concreto como condição para utilização dos agregados de RCD reciclados em concretos (Rilem Recommendation, 1994; Hendriks, 2000). A norma holandesa prevê o uso da catação por análise visual para controlar presença de algumas espécies minerais como partículas de cerâmicas e argamassas ou outras que não sejam partículas de concreto em agregados graúdos reciclados (Hendriks, 2000). Trata-se de um método trabalhoso, demorado (um operador leva 8h para separar uma amostra de 5kg), subjetivo mas simples (não necessita de equipamentos específicos para a realização).

O método apresenta problemas quanto à reprodução visto que o critério de definição é influenciado pelo operador e sua experiência (Sant'Agostinho; Kahn, 1997; Hendriks, 2000). Por exemplo, a distinção entre partículas de concreto e argamassa presentes nos agregados graúdos de RCD reciclados brasileiros por análise visual não é possível (Angulo; John 2001). Essencialmente, a principal diferença entre estas duas espécies minerais é física; ou seja, nas propriedades de absorção de água e massa específica aparente.

Um outro aspecto negativo do método da catação é que as espécies minerais identificadas podem apresentar significativa variação nas propriedades físicas dos agregados graúdos de RCD reciclados conforme diagnosticado em Angulo *et al.* (2003b) (Figura 2).

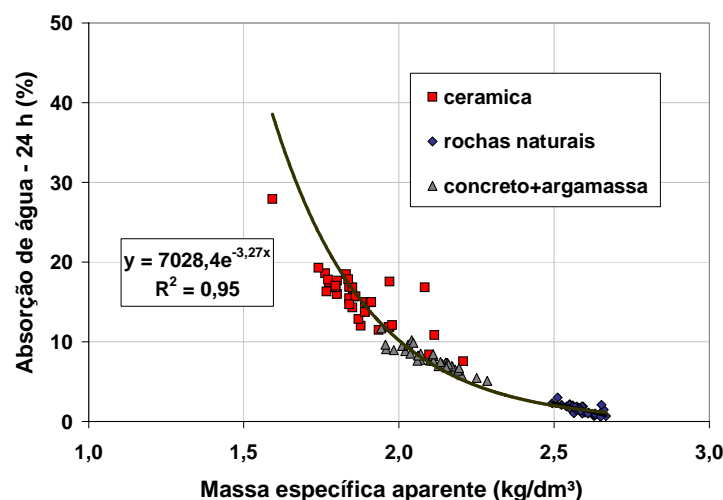


**Figura 2** Variabilidade de massa específica aparente (a) e absorção de água (b), expressa em, frequência relativa, da espécie mineral cerâmica identificada a partir do método de catação em agregados graúdos de RCD reciclados nacionais (dados de Angulo, 2000).

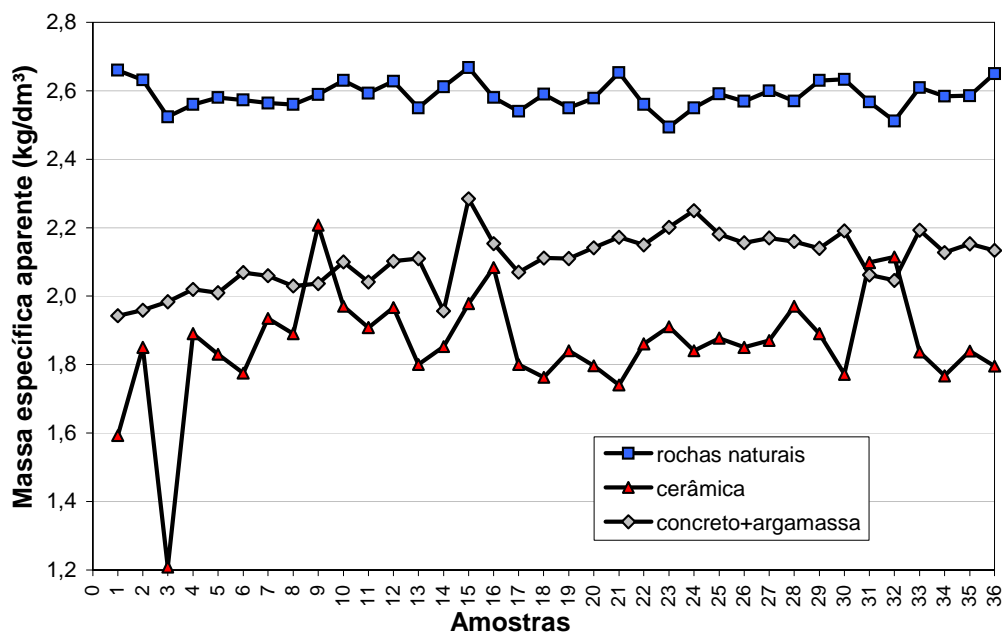
Não foi identificado o uso da técnica de catação para agregados miúdos de RCD reciclados. Neste caso, técnicas de apreciação petrográfica podem ser utilizadas, método que exige especialista para conhecimento do tipo de rocha, estado de alteração etc (ABNT, 1992). Quando uma análise quantitativa é requerida, é normalmente realizada a contagem de partículas, assumindo-se que todas as partículas possuem mesmo volume (SMITH; COLLIS, 1993). Assim, para minimizar erro é necessário realizar esta análise para uma fração granulométrica.

A especificação da RILEM emprega a técnica de separação mineral por meio denso para separar e controlar o teor de partículas mais porosas presentes nos agregados graúdos de RCD reciclados (Rilem Recommendation, 1994). Trata-se de técnica mais rápida que a catação e que também pode ser utilizada para os agregados miúdos. Embora na aplicação desta técnica a natureza das espécies minerais não seja considerada, dados de Angulo (2000) permite sugerir que é possível isolar com alguma eficiência espécies minerais presentes nos agregados graúdos de RCD reciclados visto que existe pouca sobreposição entre os valores de massa específica aparente das espécies minerais (Figura 4).

Como os materiais de construção são compostos basicamente de espécies Si, Al, e Ca, a massa específica aparente dos agregados de RCD reciclados é determinada pela porosidade (Angulo et al., 2003b) (Figura 3).



**Figura 3** Correlação entre massa específica aparente e absorção de água para as espécies minerais definidas pela catação (dados de Angulo, 2000).



**Figura 4** Resultados de massa específica aparente das espécies minerais de agregados graúdos de RCD reciclados nacionais identificadas pela catação (dados de Angulo, 2000). Contaminantes como madeira, plástico, asfaltos possuem massa específica em torno de 1 kg/dm<sup>3</sup>.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar se a técnica de separação mineral por líquidos densos é eficiente para classificar as espécies minerais presentes nos agregados de resíduos de construção e demolição reciclados do ponto de vista químico e mineral.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Amostragem

Amostras representativas dos agregados de RCD reciclados foram coletadas em duas usinas de reciclagem situadas em diferentes cidades do estado de São Paulo: a) São Paulo – região de Itaqueria e b) Vinhedo.

As usinas classificavam os agregados reciclados produzidos em dois diferentes tipos: cinza (com predominância de materiais à base de cimento) ou vermelho (com predominância de materiais cerâmicos vermelhos, solos e outros).

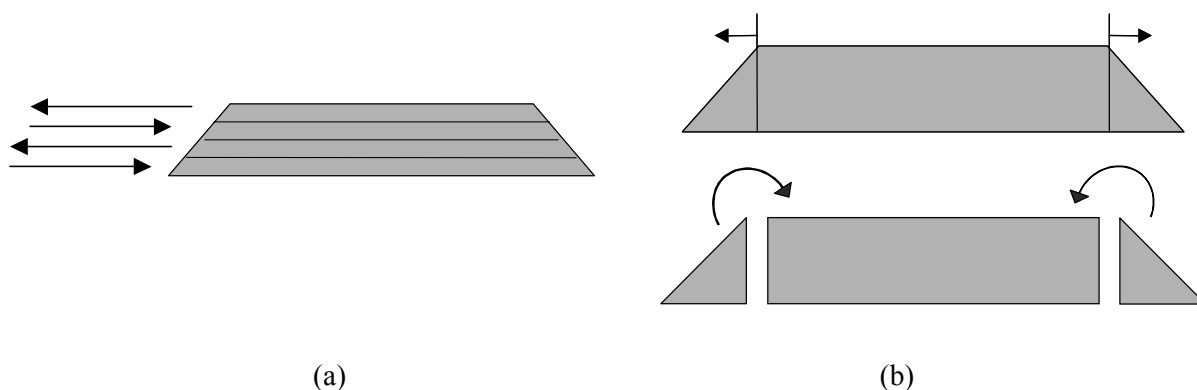
Os seguintes tipos de agregados foram coletados: **ARCI** (Agregado Reciclado Cinza de Itaqueria), **ARVI** (Agregado Reciclado Vermelho de Itaqueria) e **ARVV** (Agregado Reciclado Vermelho de Vinhedo).

A massa representativa de agregados de RCD reciclados (1.630 kg) foi calculada a partir da Teoria de Pierre Gy, considerando as seguintes premissas principais: a) dimensão máxima do agregado de 25,4 mm; b) teor mínimo das espécies minerais de interesse (concreto+rochas naturais) de 26% e c) valor mínimo de massa específica aparente das espécies minerais presentes de 1,85 kg/dm<sup>3</sup> (cerâmica vermelha). As duas últimas premissas foram adotadas a partir dos dados de Angulo (2000).

Como as usinas operavam aproximadamente 4h por dia, 1 lata (18 dm<sup>3</sup>) de agregados foi coletada a cada hora de produção diária na saída da correia transportadora (antes do peneiramento). Este plano de amostragem é conhecido como o sistemático com incrementos coletados em intervalos regulares (Luz et al., 1998).

Ao final do dia, o responsável pela coleta distribuía as quatro latas de 18 dm<sup>3</sup> de maneira uniforme e ininterrupta ao longo de uma pilha alongada em baldes de 8 dm<sup>3</sup>. As sucessivas camadas da pilha eram construídas com a direção de distribuição alternada. Após 20 dias de produção, as extremidades foram

retomadas e redistribuídas seguindo mesmo procedimento (Figura 5)



**Figura 5 (a) Formação da pilha alongada e (b) corte e retomada dos extremos da pilha.**

Ao final do processo, 4 alíquotas de aproximadamente 65 kg (total estimado de 1/10 em volume da pilha) foram retiradas e novamente homogeneizadas em uma pilha de laboratório seguindo os mesmos procedimentos. Uma alíquota de 1/4 (cerca de 65 kg) foi destinada aos ensaios de caracterização.

### 3.2 Peneiramento

O peneiramento foi realizado a seco para as amostras de agregados reciclados de Itaquera. Já as amostras de agregados reciclados de Vinhedo foram peneiradas a úmido com o objetivo de reduzir a quantidade de partículas finas aderidas nos agregados e facilitar a separação mineral por líquidos densos. As peneiras utilizadas foram as de aberturas de malha de 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 graúdos de RCD reciclados foram identificados como: **AGRVI** (Agregado Graúdo Reciclado Vermelho de Itaquera), **AGRCI** (Agregado Graúdo Reciclado Cinza de Itaquera) e **AGRVV** (Agregado Graúdo Reciclado Vermelho de Vinhedo).

Os agregados miúdos de RCD reciclados foram identificados como: **AMRVI** (Agregado Miúdo Reciclado Vermelho de Itaquera), **AMRCI** (Agregado Miúdo Reciclado Cinza de Itaquera) e **AMRVV** (Agregado Miúdo Reciclado Vermelho de Vinhedo).

### 3.3 Separação por líquidos densos

A separação dos agregados de Itaquera foi realizada individualmente para as frações retidas nas seguintes peneiras de abertura de malhas (em mm): 19,1; 12,7; 9,52; 4,76; 1,19 e 0,297. A separação dos agregados de Vinhedo foi realizada individualmente para as frações retidas nas seguintes peneiras de abertura de malhas (em mm): 19,1; 12,7; 9,52; 4,76; 2,39; 1,19 e 0,297.

Alíquotas (1/2 ou 1/4 do volume) destas frações, com massas variando entre 1 e 3 kg em função do tamanho médio das partículas, foram submetidas à separação por líquidos com densidades de 1,7; 1,9; 2,2; e 2,5 kg/dm<sup>3</sup>. As diversas frações foram divididas nos seguintes intervalos de densidade (kg/dm<sup>3</sup>):  $d < 1,7$ ;  $1,7 < d < 1,9$ ;  $1,9 < d < 2,2$ ;  $2,2 < d < 2,5$ ; e  $d > 2,5$ . A massa das espécies minerais separadas nos diversos intervalos de densidade foi avaliada e os seus resultados expressos percentualmente.

Líquidos com densidades de 1,7 e 1,9 kg/dm<sup>3</sup> foram obtidos por dissolução de cloreto de zinco em água. Os demais foram obtidos por solução de bromofórmio e álcool etílico. Os valores de peso específico foram ajustados pela determinação da massa da solução em um balão volumétrico com volume definido de 100ml.

As frações retidas nas peneiras de abertura 19,1 mm a 1,19 mm foram separadas em béqueres. As frações retidas na peneira 0,297 mm foram separadas em funil tipo Squib. As partículas, quando imersas na solução com peso específico conhecido, foram agitadas levemente definindo o produto

flutuado e afundado. Em béqueres, os produtos flutuados e afundados foram retirados por cesto. Em funil tipo Squib, os produtos afundados foram retirados por registro inferior do funil sendo que o restante foi considerado flutuado. Todos os produtos foram filtrados em papel filtro com auxílio de bomba de vácuo e, em seguida, foram lavados com solvente (água para  $\text{ZnCl}_2$  e álcool etílico para  $\text{CHBr}_3$ ).

### 3.4 Caracterização química e mineral

Alíquotas (1/2 do volume) das diversas frações separadas por intervalos de densidade foram reduzidas a dimensão menor que 1 mm por moinho de rolos. Novas alíquotas (50-100g) foram pulverizadas até 10-20  $\mu\text{m}$  em moinho de discos oscilantes para caracterização química e até 37  $\mu\text{m}$  em moinho planetário para a caracterização mineral.

A caracterização química foi de dois tipos: a) Quantitativa, realizada por fluorescência de raios X (FRX) com análise dos teores dos onze óxidos totais mais abundantes:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ , além de perda ao fogo a 1050° C e b) Fração solúvel por ataque ácido empregando solução de HCl 20%.

O espectrômetro empregado na FRX foi MagixPro, marca PANAnalytical, a partir de pérolas fundidas com 1 g de amostra e 7g de fundente. O ataque ácido foi realizado com solução de HCl 20%, sendo o teor de solúveis em ácido expresso pela eq.1.

$$S = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \text{ (eq.1)}$$

em que:

S – teor de solúveis em ácido, expressa em porcentagem;

$M_1$  – massa antes do ataque ácido.

$M_2$  – massa após o ataque ácido.

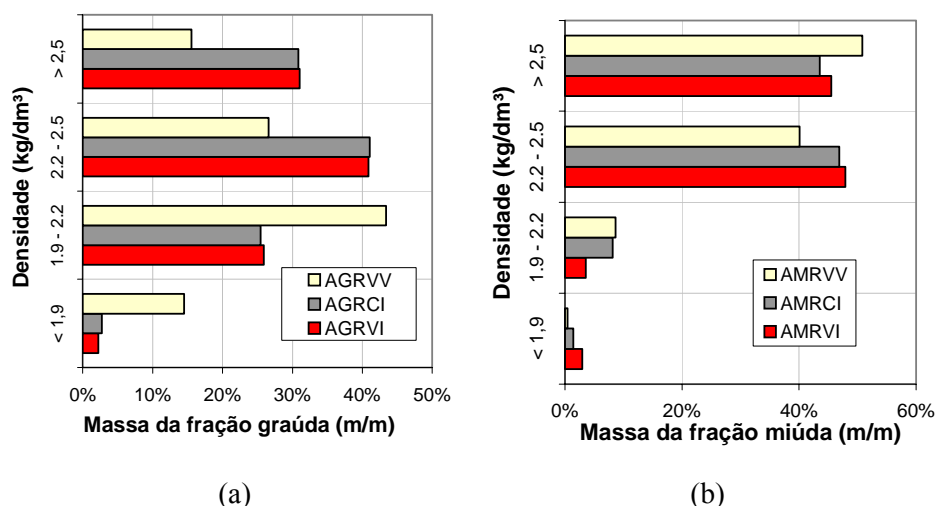
A caracterização mineral foi realizada por difração de raios-X através do método do pó. Foi empregado o difratômetro MPD 1880, marca Philips, com tubo de cobre e faixa angular de operação ( $2\theta$ ) de 2,5° a 80°. As amostras foram caracterizadas em função dos resultados de análise química e análise visual das espécies minerais. Cada tipo de agregado (ARVI, ARCI e ARVV) foi caracterizado nas seguintes frações e nos seguintes intervalos de densidade: 19,1 mm ( $d > 2,5$ ); 9,5 mm ( $1,9 < d < 2,2$ ); 4,8 mm ( $2,2 < d < 2,5$ ); 1,19 mm ( $1,9 < d < 2,2$ ) e 0,297 mm ( $d > 2,5$ ).

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Distribuição (em massa) da separação

Como Angulo *et al.* (2003a) mostram que os valores médios de massa específica aparente das partículas de agregados graúdos de RCD reciclados se encontram dentro dos intervalos de densidade definidos pela separação por líquidos densos, pode-se assumir que o intervalo de densidade definido na separação representa o intervalo de valores de massa específica aparente das partículas.

A Figura 6 mostra a distribuição em massa, expressa em porcentagem, das espécies minerais contidas nos diversos intervalos de separação por líquidos densos dos agregados de RCD reciclados. Tanto a fração graúda quanto a miúda é composta por partículas de diferentes porosidades; ou seja, partículas com diferentes valores de massa específica aparente e de absorção de água.



**Figura 6** Distribuição em massa dos agregados grãos (a) e miúdos (b) a partir da separação por líquidos densos.

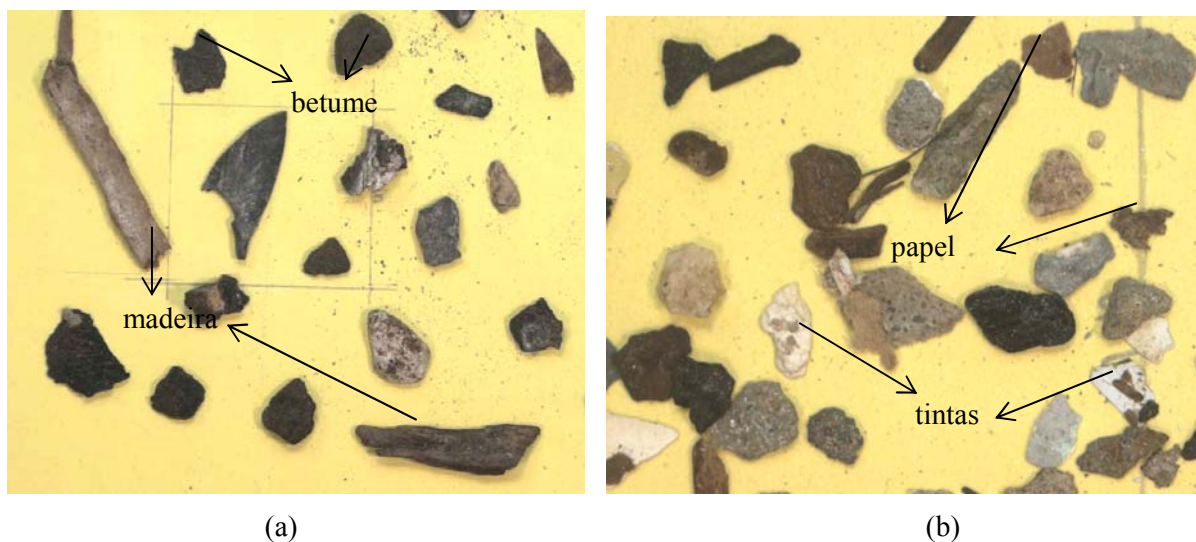
Os agregados miúdos apresentam maior participação de frações com densidade acima de 2,2 kg/dm³, se comparados com os grãos. Este fato é independente da origem (Vinhedo ou Itaquera) ou classificação (vermelho ou cinza). A cominuição transforma poros internos em rugosidades superficiais, reduz as partículas mais friáveis a pó, liberando as partículas minerais, com areia.

Existem diferenças significativas na distribuição de densidade dos agregados grãos produzidos em São Paulo, mais densos, que os produzidos em Vinhedo. Estas diferenças podem ser explicadas por diferenças na origem das matérias primas e, eventualmente por uma melhor seleção dos lotes reciclados em Itaquera. O método não revelou diferenças significativas entre os agregados cinzas e vermelhos de Itaquera. No entanto, os agregados vermelhos apresentam maior teor de agregados miúdos (< 4,8 mm), o que permite supor que as frações menos resistentes presentes nestes lotes sofreram maior redução durante cominuição.

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.

#### 4.2 Partículas não minerais ( $d < 1,9 \text{ kg/dm}^3$ )

As partículas não-minerais (conhecidas como contaminantes) aparecem nas espécies flutuadas quando a densidade de corte do líquido é  $d < 1,9 \text{ kg/dm}^3$  em que a caracterização química por FRX não é mais recomendada visto que a pulverização das amostras se torna difícil. Elas são visualmente predominantes se comparado às espécies minerais ainda presentes nos agregados grãos reciclados quando  $d < 1,7 \text{ kg/dm}^3$ . Nos agregados miúdos reciclados, elas são visualmente predominantes quando  $d < 1,9 \text{ kg/dm}^3$  (Figura 7).

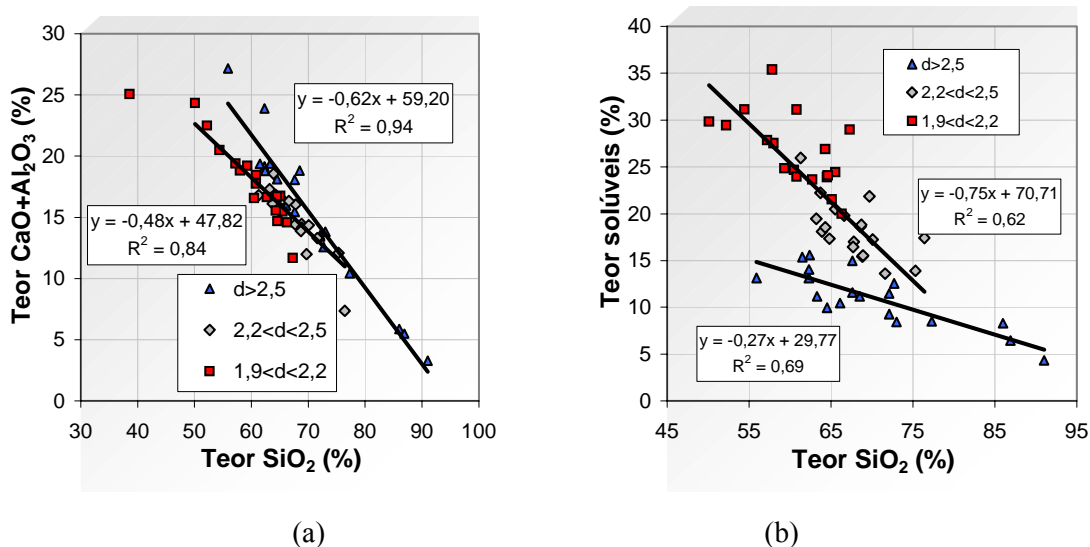


**Figura 7** Partículas não minerais presentes em (a) AGRVI retido na peneira 9,5 mm  $d < 1,7 \text{ kg/dm}^3$  e (b) AMRVV retido na peneira 2,4 mm  $d < 1,9 \text{ kg/dm}^3$  (aumento 5x).

As partículas não-minerais presentes nos agregados de RCD reciclados são principalmente películas de tintas, madeiras, papel e materiais betuminosos.

### 4.3 Composição química das partículas minerais ( $d > 1,9 \text{ kg/dm}^3$ )

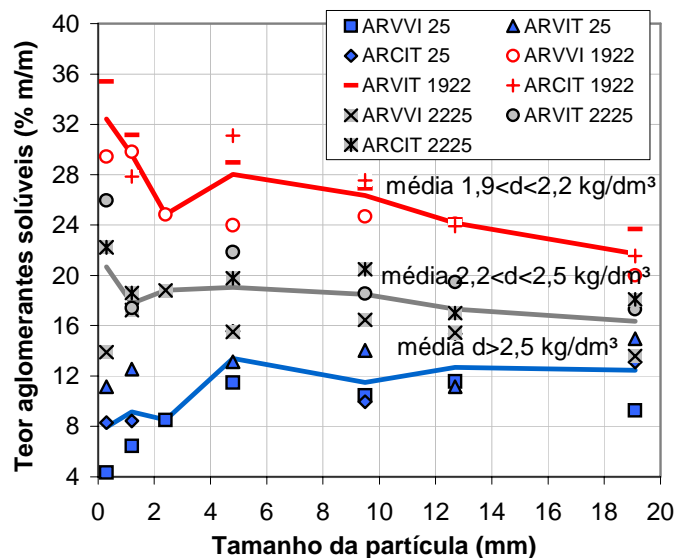
As partículas minerais ( $d > 1,9 \text{ kg/dm}^3$ ) são compostas por três óxidos totais principais:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ . Os teores de  $\text{SiO}_2$  são inversamente proporcionais à soma dos teores de  $\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Estes teores também são inversamente proporcional aos teores solúveis em ácido presentes nas partículas minerais (Figura 8). Em regiões onde não se utilizam agregados calcários, o teor de solúveis em ácido pode indicar o teor de pasta de cimento – naturalmente mais porosa, que pode ser rapidamente estimada pelo teor  $\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  obtido pela análise química.



**Figura 8** Correlação linear, inversamente proporcional, entre os teores de  $\text{SiO}_2$  e a soma dos teores de  $\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (a) e entre os teores de  $\text{SiO}_2$  e teores de solúveis em ácido (b).

Os agregados contidos no intervalo de separação  $d > 2,5 \text{ kg/dm}^3$  apresentam correlações distintas para os teores de óxidos totais principais e teores de solúveis em ácido (Figura 8). O teor médio de solúveis em ácido destes agregados é inferior ao dos agregados contidos nos demais intervalos de separação por densidade, em torno de 12% para agregados graúdos e 8% para agregados miúdos (Figura 9).

Os teores de solúveis em ácido são bem distintos para os intervalos de separação: menor a densidade, maior a participação de pasta de cimento endurecida.



**Figura 9** Teores de solúveis em ácido encontrados nas espécies minerais a partir da separação por líquidos densos.

Com base nos resultados de análise química, pode-se concluir que as partículas minerais, independente das espécies minerais contidas nos intervalos de densidade, são compostas por silicatos (com a presença ou não de CSH) e carbonatos provenientes dos compostos à base de cimento.

#### 4.4 Espécies minerais ( $d > 2,5 \text{ kg/dm}^3$ )

A caracterização mineral indica a presença predominante de tectosilicatos presentes nos agregados naturais como quartzo e basalto e nas rochas naturais utilizadas na construção civil (Tabela 1).

**Tabela 1** Fases minerais presentes nos agregados de RCD reciclados ( $d > 2,5 \text{ kg/dm}^3$ ).

Agregados graúdos (AGR)		Agregados miúdos (AMR)	
AGRCI	Sílica Albita Microclínio Biotita Magnesiohornblenda (pp) Antigorita (pp) <i>Flogopita</i>	AMRCI	Sílica Albita Microclínio Biotita
AGRVI	Sílica Albita Microclínio Magnesiohornblenda (pp) Antigorita (pp) <i>Calcita</i> <i>Muscovita (pp)</i>	AMRVI	Sílica Albita Microclínio Magnesiohornblenda (pp) Antigorita (pp) <i>Calcita</i> <i>Muscovita (pp)</i>
AGRVV	Sílica Albita Microclínio Clinocloro <i>Muscovita (pp)</i>	AMRVV	Sílica Albita Microclínio Clorita <i>Silicato hidratado de Al e Na (pp)</i> <i>Muscovita (pp)</i>

Nota: pp significa possível presença e, em itálico, carbonatos e filosilicatos.

Esta fase é, portanto composta de agregados naturais recobertos com uma camada mais ou menos fina de cimento hidratado. Nesta faixa de densidade, a presença de cerâmicas é esporádica.

#### 4.5 Espécies minerais ( $1,9 < d < 2,5 \text{ kg/dm}^3$ )

As espécies minerais contidas nos intervalos de separação  $1,9 < d < 2,2$  e  $2,2 < d < 2,5 \text{ kg/dm}^3$  possuem correlações semelhantes para os teores de óxidos totais principais e teores solúveis em ácido (Figura 8). A caracterização mineral indica a presença de diferentes tipos de silicatos como os tectosilicatos e filosilicatos (originados da cerâmica vermelha, de solos entre outros) e carbonatos (originados dos compostos à base de cimento). Embora o CSH e portlandita não foram detectados – a difração de raios X não detecta fases cristalinas presentes em teores inferiores a 5% - sabe-se que estas fases minerais estão presentes (Tabela 2).

**Tabela 2 Fases minerais presentes nos agregados de RCD reciclados ( $1,9 < d < 2,2 \text{ kg/dm}^3$ ).**

Agregados graúdos (AGR)		Agregados miúdos (AGM)	
AGRCI	Sílica	AMRCI	Sílica
	Microclínio		Microclínio
	<i>Calcita</i>		Silicon oxide (pp)
	<i>Dolomita (pp)</i>		Albita
	<i>Hidrocalumita (pp)</i>		<i>Calcita</i>
	<i>Ilita (pp)</i>		<i>Muscovita (pp)</i>
	<i>Muscovita (pp)</i>		
AGRVI	Sílica	AMRVI	Sílica
	Microclínio		Microclínio
	Albita		Albita
	Antigorita (pp)		Antigorita (pp)
	<i>Calcita</i>		<i>Calcita</i>
	<i>Muscovita (pp)</i>		<i>Muscovita (pp)</i>
AGRVV	<b>Sílica</b>	AMRVV	Sílica
	<b>Microclínio</b>		Microclínio
	<i>Calcita</i>		<i>Calcita</i>
	<i>Hidróxido de Ca/Al (pp)</i>		<i>Hidrocalumita (pp)</i>
	<i>Ilita</i>		<i>Muscovita</i>
			<i>Ortosilicato magnésio tricálcico (pp)</i>
			<i>Phillipsita (pp)</i>

Nota: pp significa possível presença e, em itálico, carbonatos e filosilicatos.

Visualmente é possível identificar partículas de cerâmica vermelha ou branca e partículas cimentícias (Figura 10). As partículas cimentícias são partículas mistas de tectosilicatos provenientes dos agregados naturais, e produtos de hidratação do cimento.



**Figura 10 Espécies minerais encontradas no intervalo de separação  $1,9 < d < 2,2 \text{ kg/dm}^3$ . Partículas cimentícias (a) e partículas de cerâmica vermelha. Observar que as partículas vermelhas encontram-se com a superfície limpa, pouco contaminada com pasta de cimento.**

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo três amostras de agregados produzidos pela reciclagem da fração A de RCD, representativas de duas plantas de reciclagem foram estudados utilizando uma combinação de técnicas, incluindo separação por peneiramento, líquidos densos, técnicas de análise químicas e difração de raios X, além de análise visual.

Os resultados permitem concluir que:

- a) 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.
- b) O teor de solúveis em ácido revela o teor de pasta de cimento hidratada. Este teor tem relação com a massa específica das partículas.
- c) 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;
- d) A classificação em vermelho e cinza pode não ser significativa em termos de variação de porosidade e, potencialmente, de resistência mecânica dos agregados.
- e) Os agregados miúdos apresentam na média maior valor de massa específica aparente, e portanto tendem a ser mais resistente que os agregados graúdos;
- f) O produto flutuado em 1,9 kg/dm<sup>3</sup> concentrou quase a totalidade dos contaminantes, como madeiras, papel e materiais betuminosos;
- g) Agregados com densidade acima de 2,5g/cm<sup>3</sup> são predominantemente rochas naturais, envolvidas por uma camada de pasta de cimento endurecida, sendo que o teor de pasta endurecida é relativamente baixo; e
- h) Agregados com densidade variando entre 1,9 e 2,5g/cm<sup>3</sup> são compostos predominantemente por cerâmicas (vermelha e branca) e partículas cimentícias, de teor de pasta superior ao de partículas mais densas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**. p. 583-598.

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.

ANGULO, S.C.; JOHN, V. M. Determinação dos teores de concreto e argamassa em agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. **In:** 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais**. IBRACON. Em CD-Rom.

ANGULO, S.C.; JOHN, V.M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. **In:** VIII ENTAC, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais**. ANTAC. P.1613-1624.

ANGULO, S.C. *et al.* Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. **In:** VI Seminário Seminário de Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, 2003a, São Paulo. **Anais**. IBRACON CT-206/IPEN. Em CD-Rom.

ANGULO, S.C. *et al.* Characterisation and recyclability of construction and demolition waste in Brazil. **In:** Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications with Alternative Materials, 2003b, San Sebastian. **Proceedings**. ISCOWA. p.209-218.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7389 – Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado para concreto. 1992.

COLLINS, R. Recycled concrete. **Quarry management**. dezembro, p.31-36, 1997.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução nº 307**. 05 de julho de 2002.

EC (EUROPEAN COMMISSION). **Management of construction and demolition waste**. Working document, 2000. Disponível em: < <http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment/> >. Acessado em 09/2002.

HANSEN, T.C. **Rilem report 6 – recycling of demolished concrete and masonry**. Londres: E& FN SPON/Chapman & Hall, 1992, 305p.

HENDRIKS, C.F. **The building cycle**. Holanda: Ed. Aeneas, 2000, 231 p.

HOBBS, G.; HURLEY, J. Deconstruction and reuse of construction materials. **In: Deconstruction and material reuse: technology, economy and policy**, 2001, CIB Publication 266. **Proceedings**. p. 98-124.

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

KOHLER, G.; PENZEL, U. State-of-art development of demolition rubble recycling aimed to high-grade application. **Aufbereitungs technik**. vol. 38, n. 3, 1997.

KOWALCZYK, T *et al.* State of art deconstruction in Netherlands. **In: Deconstruction and material reuse: technology, economy and policy**, 2000, CIB Publication 252. **Proceedings**. p.95-129.

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

MEHTA, P. K; MONTEIRO P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. São Paulo: Ed. PINI, 1994, 573p.

MULDER, E. *et al.* Closed materials cycles for concrete and masonry, as part of an integrated process for the reuse of the total flow of C&D waste. **In: Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications with Alternative Materials**, 2003b, San Sebastian. **Proceedings**. ISCOWA. p. 219-229.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. 189 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

RILEM RECOMMENDATION. Specification for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**. n.27, p.557-9, 1994.

SANT'AGOSTINHO, L.M; KAHN, H.. Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais. **Boletim Técnico (PMI/69)** – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 29p. 1997.

SMITH, M.R.; COLLIS, L. **Aggregates – sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes**. Londres: The Geological Society, 1993, 339p.

SYMONDS. Construction and demolition waste management practices and their economic impact. 1999. Disponível em < [http://europa.eu.int/comm/environment/waste/studies/cdw/c&dw\\_report.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/waste/studies/cdw/c&dw_report.htm) >. Acessado em 09/2002.

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

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FINEP – Fundo Verde e Amarelo, FAPESP e CNPq incluindo a Prefeitura de São Paulo (Sr. Dan Schneider e funcionários), a empresa NORTEC (Sr. Artur Granato e funcionários), a Prefeitura de Vinhedo (Sr. Geraldo, Sr. Henrique e demais funcionários) e os laboratórios LCT, LTM e CPqDCC da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.