

**GUSTAV HAWLITSCHK**

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS MIÚDOS  
PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**São Paulo**

**2010**

**GUSTAV HAWLITSCHKE**

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS MIÚDOS  
PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas  
do curso de graduação do Departamento de  
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientadora: Msc. Carina Ulsen

Co-Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

**São Paulo**

**2010**

TF-2010

H317c

syano 2169946

GUSTAV HAWLITSCHKE

M2010m

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700008312

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Hawlitschek, Gustav**

**Caracterização tecnológica de agregados miúdos produzidos**

**a partir de resíduos da construção civil / G. Hawlitschek. -- São Paulo, 2010.**

**32 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.**

**1. Caracterização tecnológica de minérios 2. Resíduos de construção (Reciclagem) -- Brasil I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.**

Dedico este trabalho a minha mãe, Silvia Maria de Oliveira, e meu irmão, Philippe Hawlitschek, pelo amor e dedicação incondicionais, ao meu tio, Marcelo Roque de Oliveira, o melhor pai que eu poderia ter tido e aos meus orientadores, Carina Ulsen e Henrique Kahn, por toda dedicação, ensino e respeito durante sua realização.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Carina Ulsen e Henrique Kahn por me ajudarem a enxergar que além da selva de picaretagem, arrogância e corrupção que nos cerca existe a possibilidade uma vida honesta e digna de muitas conquistas. Agradeço-os por todo tempo dedicado ao aprendizado dos alunos: dias, noites, sábados e domingos foram dedicados sempre que foi necessário. Uma dedicação comparável aos pais ensinando os filhos a andarem de bicicleta (Jaime, J. ; 2009). Aos funcionários do LCT e LTM também registro aqui minha profunda gratidão, todos sempre estiveram dispostos a me ajudar quando aparecia alguma pedra no meio do caminho (Andrade, C. D. ; 1928).

Agradeço aos meus amigos por tornarem as aulas mais divertidas e os estudos menos desgastantes, por estarem sempre do meu lado, inclusive durante os “roles ruins” que, apesar de tudo, são lembranças únicas que guardarei para sempre. Segundo (Pessoa, F.; 1932), o valor das coisas não está no tempo em que elas duram, mas na **intensidade** com que acontecem, por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis. Sendo assim, agradeço mais uma vez aos meus companheiros de sala, pessoas incomparáveis, por estes 5 anos, essa era que, com certeza, foi a mais **explosiva, frenética e intensa**, a era "**Dragster**", a mais valiosa e inesquecível da minha vida.

Frente ao inevitável fim dessa era, só há uma coisa que pode resumir e, ao mesmo tempo, agradecer a todos os momentos que passamos juntos em viagens, festas e “estudos”:

“na na na na na na na na...**THUNDER!**... na na na na na na na na...**THUNDER!**”  
(AC/DC; 1990)

## RESUMO

Este estudo consiste em identificar as propriedades da fração areia oriunda de amostras de resíduos de construção e demolição para que tais informações sejam utilizadas como uma ferramenta para direcionamento da rota de reciclagem a ser avaliada (processamento). São apresentados os resultados de estudos de caracterização tecnológica de areias oriundas de resíduos de diferentes localidades e de areia produzida por britador de impacto vertical.

Os resultados demonstram a potencialidade do uso dessa fração como matéria-prima na construção. Adicionalmente, demonstram que o processamento aplicado foi eficiente para reduzir a porosidade destes agregados melhorando a qualidade da areia reciclada e aumentando seu potencial para aplicações mais nobres.

A motivação para esta pesquisa advém do fato destes resíduos representarem cerca de 50% do total de resíduos sólidos urbanos, dos quais a fração areia corresponde a cerca de metade desse montante. A demanda atual pela reciclagem deve-se ao aumento do consumo de agregados, à exaustão de jazidas próximas aos grandes centros (distâncias médias > 50 km) e à proibição de deposição de resíduos inertes em aterros sanitários (maior custo para deposição). Este cenário contribui para o aumento vertiginoso dos custos das matérias-primas (100% nos últimos quatro anos), com impacto direto nos custos de infra-estrutura e habitação.

A proposta de ampliar as taxas de reciclagem está alinhada com a política internacional de desenvolvimento sustentável e preservação ambiental. Insere socialmente, também, todas as pessoas envolvidas ao processo. É uma alternativa tecnicamente viável e colabora com o desenvolvimento econômico, fundamental para o avanço produtivo do país.

**Palavras-chave:** agregado reciclado, caracterização tecnológica, construção sustentável

## ABSTRACT

This study aims to identify the properties of the sand fraction from construction and demolition waste in order to use these characteristics to guide the recycling process. It is presented the technological characterization results of the sand fraction from different construction and demolition wastes and also from sand produced by tertiary crushing.

The results demonstrate the potential to use this fraction as raw material in construction. In addition it is demonstrated that the mineral processing was efficient to reduce the porosity of these aggregates improving the quality of recycled sand and increasing its potential to expand its applications.

The motivation for this research is that these waste represent about 50% of the total municipal solid waste, which the sand fraction is about half that amount. The demand for recycling is due to the increasing consumption of aggregates, the exhaustion of deposits close to the main centers (distances > 50 km) and the prohibition of dumping inert waste in landfills (higher cost for disposal). This scenario contributes to the soaring costs of raw materials (100% over the last four years), with direct impact on the costs of infrastructure and housing.

The proposal to increase recycling rates is in line with the international policy of sustainable development and environmental preservation. It insert socially the people involved in the process, it is technically feasible and it collaborates to the economic development of the country.

**Key-words:** recycled aggregates, technological characterization, sustainable construction.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>8</b>
3.1	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	8
3.2	PANORAMA DA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	8
3.3	DEFINIÇÕES DE AGREGADOS .....	9
3.4	AREIA ORIUNDA DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	10
3.5	PRODUÇÃO DE AREIA .....	11
3.6	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	12
3.6.1	<i>Amostragem</i> .....	12
3.6.2	<i>Separações minerais em líquido denso</i> .....	13
3.6.3	<i>Absorção de água</i> .....	14
3.6.4	<i>Composição química</i> .....	14
3.6.5	<i>Caracterização microestrutural</i> .....	15
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA FRAÇÃO AREIA DE RCD DE DIFERENTES ORIGENS .....	15
4.2	CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DE RCD DA REGIÃO DO ABC-SÃO PAULO .....	16
4.2.1	<i>Amostragem e preparação de amostras</i> .....	16
4.2.2	<i>Produção de areia</i> .....	17
4.2.3	<i>Caracterização tecnológica</i> .....	18
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS AMOSTRAS.....	20
5.1.1	<i>Análise granulométrica</i> .....	21
5.1.2	<i>Distribuição por intervalo de densidade</i> .....	21
5.1.3	<i>Composição química</i> .....	23
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AREIA RECICLADA POR BRITAGEM TERCIÁRIA, AMOSTRA ABC-URBEM 23	
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>28</b>

### APÊNDICE I - COMPOSIÇÕES QUÍMICAS COMPARATIVAS DA AREIAS DO ABC

## 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, os Resíduos da Construção Civil (ou RCD - resíduos de construção e demolição) foram utilizados pela primeira vez na reconstrução de cidades europeias no período pós-guerra. No entanto, melhorias nos processos de reciclagem, procedimentos de mistura e dosagem intensificaram-se somente no final da década de 1990, com a publicação de resoluções normativas (Rilem Recommendation, 1994).

A demanda atual pela reciclagem deve-se ao aumento crescente do consumo de agregados, à exaustão de jazidas próximas aos grandes centros (distâncias médias > 50 km) e à proibição de deposição de resíduos inertes em aterros sanitários (CONAMA 307), aumentando os custos de deposição dos resíduos. Este cenário tem contribuído para o aumento vertiginoso dos custos dos agregados naturais, chegando a mais de 100% em algumas regiões do país nos últimos 9 anos (La Serna e Rezende, 2009), com impacto direto nos custos de infra-estrutura e habitação.

Os RCD representam cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos de cidades de médio e grande porte (Ulsen, 2010). Entretanto, as tecnologias de reciclagem e os estudos de aplicações de agregados reciclados são direcionados à fração de agregados graúdos (Poon, Kou *et al.*, 2002). O cenário para os agregados miúdos (fração da areia) é ainda mais crítico, pois apesar de representar de 40 a 60% (em massa) do RCD, é descartada como resíduo da própria reciclagem ou utilizada como produto de baixo valor agregado (prática conhecida como *downcycling*). Isso se deve ao elevado grau de contaminação desta fração (solo e material pulverulento) e à falta de conhecimento tecnológico deste material. Assim, o desenvolvimento de processos que melhorem a qualidade deste material para sua utilização como matéria-prima é fundamental para a reciclagem total dos resíduos.

A possibilidade de instalação de usinas de reciclagem próximas aos centros geradores de resíduos e consumidores de matérias-primas permite a redução das distâncias de transporte, parâmetro decisivo no preço de agregados (La Serna e Rezende, 2009). Essa medida impacta imediatamente nos custos dos agregados reciclados, redução das emissões de CO<sub>2</sub> (transporte por caminhões), redução de tráfego e menor desgaste de pavimentos. Os benefícios da reciclagem estendem-se ao aumento da vida útil de jazidas de matérias-primas não renováveis, redução da extração ilegal de areia e das deposições ilegais de resíduos e aumento da vida útil dos aterros de inertes.

A proposta de ampliar as taxas de reciclagem está alinhada com a política internacional de desenvolvimento sustentável e preservação ambiental. Insere socialmente, também, todas as pessoas envolvidas ao processo. É uma alternativa tecnicamente viável e colabora com o desenvolvimento econômico, fundamental para o avanço produtivo do país.

Dentro deste contexto, este estudo consiste em caracterizar as propriedades dos agregados miúdos, oriundos de usinas de reciclagem, e realizar uma nova etapa de processamento para melhorar a qualidade do material. Este projeto se insere em um programa mais amplo de estudos de RCD, visando à avaliação de suas características e diferentes alternativas de uso, bem como, sua variabilidade e do estabelecimento de procedimentos padronizados de caracterização. O projeto de caráter multidisciplinar tem sido desenvolvido por alunos, pesquisadores e docentes da Escola Politécnica da USP há cerca de 10 anos, já tendo formado mais de uma dezena de mestres e doutores.



## 2 OBJETIVO

O trabalho ora proposto tem por objetivos específicos:

- identificar as propriedades dos agregados miúdos oriundos de resíduos de construção e demolição britados em usinas de reciclagem;
- realizar uma nova etapa de britagem no britador de impacto vertical (VSI), caracterizando as propriedades do material obtido;
- comparar as propriedades do material antes e após a britagem em VSI, avaliando seu ganho de qualidade.

Como consequência deste estudo, as informações geradas serão fundamentais para o desenvolvimento de uma tecnologia de processamento que permita a elevação das taxas de reciclagem nacionais.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Resíduos de construção e demolição

Entende-se por resíduos de construção e demolição (RCD) como sendo resíduos gerados durante o ciclo de vida das construções civis. Os resíduos de construção e demolição (C&D) respondem por uma significativa parcela dos resíduos sólidos municipais. Gerenciá-los, numa grande cidade, é muito oneroso e difícil, e a tendência é que estas dificuldades aumentem na mesma proporção do volume gerado (Zordan, 1997).

Para BIOCYCLE (1990), apud (Zordan, 1997), RCD são “resíduos sólidos não contaminados, provenientes de construção, reforma, reparos e demolição de estruturas e estradas, e resíduos sólidos não contaminados de vegetação, resultantes de limpeza e escavação de solos. Como resíduos, incluem-se blocos, concreto e outros materiais de alvenaria, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, encanamentos, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos que não camuflam outros resíduos, fiação elétrica e equipamentos que não contenham líquidos perigosos e metais que estiverem num desses itens acima”.

### 3.2 Panorama da construção civil

A construção civil consome de 14 a 50% de todos os recursos naturais extraídos no planeta (John, 2000). Na Inglaterra, por exemplo, o índice per capita atinge 6.000 kg/ano (Hobbs e Hurley, 2001).

No Brasil, os agregados naturais estão entre os bens minerais mais consumidos sendo 90% da produção destinado à construção civil (Whitaker, 2001). O consumo de areia para a construção civil foi por volta de 225 milhões de toneladas no ano de 2002. (Rangel, Farina *et al.*, 1997) indicou um consumo de  $12 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de areia/ano só na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

A exaustão das jazidas de areia já é observada na RMSP, seja nos locais como na direção da nascente do Rio Tietê ou observada através do crescimento da distância de transporte da matéria-prima (Whitaker, 2001).

Além do consumo excessivo de matérias-primas naturais não renováveis, os impactos ambientais dessas atividades são relevantes, já que 90% são extraídas dos leitos de rios

(Almeida e Silva, 2005). A existência de áreas degradadas por deposições irregulares de resíduos (Figura 1), pela extração ilegal de areia (Figura 2) e o crescente conflito com o crescimento das cidades aumentam as restrições nas regulamentações ambientais da atividade.

Além disso, o transporte de agregados naturais para abastecer a demanda da RMSP (Região Metropolitana de São Paulo) chega a 1,35 milhões de viagens/ano ou 5.000 viagens/dia (Coelho, 2001), contribuindo com queima de combustível fósseis e emissão de CO<sub>2</sub>. Com todos esses fatores, torna-se cada vez mais necessário a elaboração de um método de reaproveitamento dos RCD.



*Foto: Vanderley John*

Figura 1 – Deposição irregular de RCD



Figura 2 - Área de reserva ambiental devastada pela extração ilegal de areia<sup>1</sup>

### 3.3 Definições de agregados

Segundo a norma (ABNT NBR 9935), define-se agregado como “material sem forma ou volume definido, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto”.

<sup>1</sup> [http://www.afg.org.br/denuncias/d0005\\_extracao\\_areia.html](http://www.afg.org.br/denuncias/d0005_extracao_areia.html)

A principal aplicação dos agregados é na fabricação de concretos e argamassas; também são empregados na construção de base de estradas de rodagem, lastro de vias férreas, elemento filtrante, etc.

Os agregados podem ser de origem (ABNT NBR 9935):

- *Naturais*: são aqueles que já se encontram sob forma de agregados na natureza, por exemplo: areia de rios ou de mina, pedregulhos;
- *Artificiais*: são os que necessitam de tratamento para atingirem as condições necessárias para seu uso apropriado, por exemplo: areia de brita

De acordo com a granulometria do material, os agregados podem ser subdivididos em: a) agregado graúdo: corresponde a “material granular com pelo menos 95% em massa retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm conforme a (NBR NM ISO 3310-1)”, ou b) agregado miúdo “material granular com pelo menos 95% em massa passante na peneira com abertura de malha de 4,75 mm”, conforme a NBR acima citada.

Os agregados reciclados não se enquadram por ora nas definições da norma brasileira, porém as definições de graúdo e miúdo seguem os mesmos padrões.

### 3.4 Areia oriunda dos resíduos da construção civil

Atualmente a principal aplicação para os agregados reciclados é em atividades de Pavimentação, entretanto esse mercado pode consumir no máximo 50% do total produzido (Hendriks, 2000; Angulo, 2003b); dessa forma há uma necessidade crescente em utilizá-los em outras aplicações, em especial, argamassas e concretos (Angulo, 2002a). Entretanto, a utilização destes para fins mais nobres exige melhorias na gestão dos resíduos, nas ferramentas de controle de qualidade e na tecnologia de beneficiamento (Angulo, 2002a; 2005; Ulsen, 2006).

Os agregados de RCD apresentam uma distribuição granulométrica na qual aproximadamente metade da massa consiste em agregado miúdo (Figura 3), o qual não possui espaço significativo no mercado devido a sua baixa qualidade e elevado teor de contaminantes (Ulsen, Kahn *et al.*, 2005). Sendo assim, é de fundamental importância estabelecer métodos de processamento que visem à melhoria da qualidade desses produtos.

O estudo da fração areia é particularmente importante porque tem sido um produto de pouca inserção no mercado de reciclagem dos resíduos sólidos urbanos, pois o desconhecimento de suas propriedades físicas, químicas e microestruturais a tornam um rejeito da própria reciclagem. No entanto, pesquisas em curso têm demonstrado outras possibilidades para aplicação desta, no entanto, suas características dependem essencialmente de procedimentos adequados de processamento.

A porosidade das partículas também é um fator de grande influencia no desempenho do material. Quanto maior a porosidade, menor é a massa específica aparente e, portanto, maior a absorção de água; logo, o agregado demandará maior consumo de água para atingir a trabalhabilidade adequada, reduzindo o desempenho mecânico de componentes construtivos, como também aumenta o consumo de cimento, contribuindo negativamente para a sustentabilidade da reciclagem de RCD (Angulo, 2005; Carrijo, 2005).

Dessa forma, a remoção da fração porosa dos agregados reciclados é a principal meta do beneficiamento mineral (Angulo, 2005).

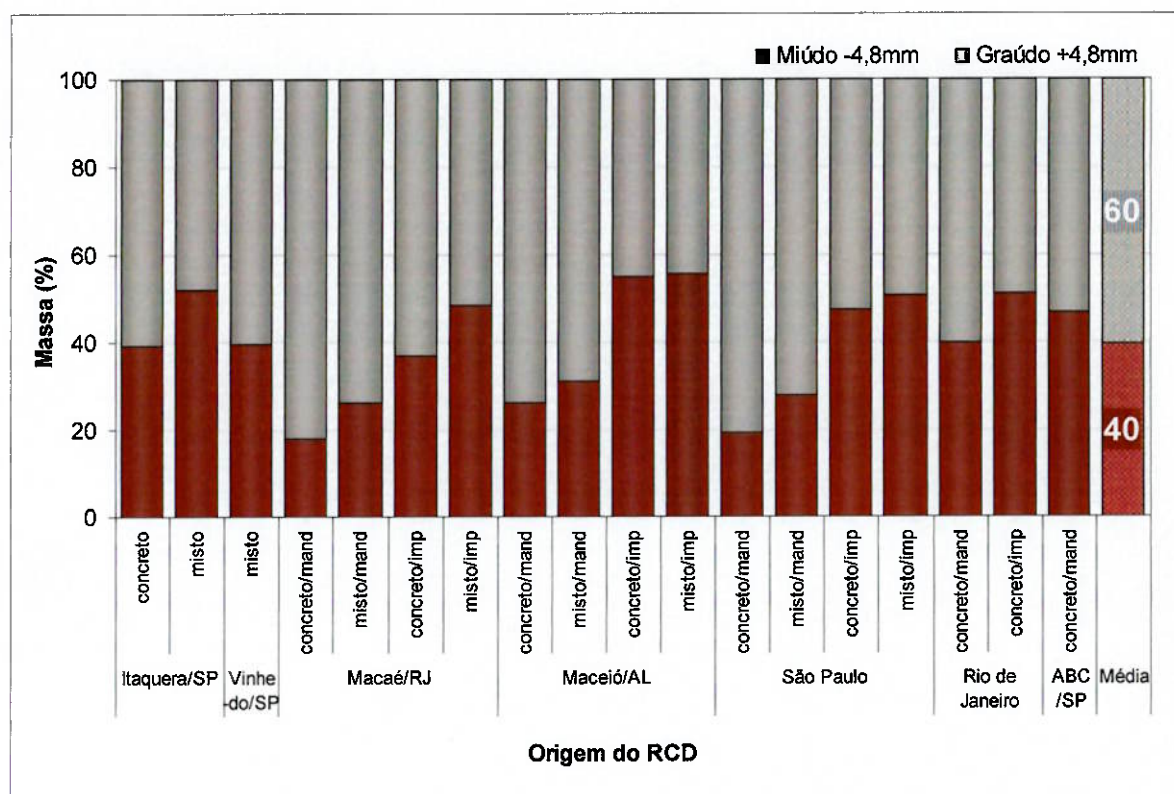


Figura 3 - Proporção mássica de finos nas amostras analisadas (Ulsen, 2010)

### 3.5 Produção de areia

Atualmente a areia proveniente de RCD não é gerada como um produto da reciclagem, ela é ocasionalmente gerada na produção dos agregados graúdos, ou seja, é um rejeito da produção de agregados graúdos reciclados. Assim, são compostas pelos materiais de maior fragilidade que sofrem cominuição mais facilmente. Dessa forma, fica evidente que para melhoria da qualidade da areia produzida a partir de RCD, esta deve ser considerada como o produto principal no processamento e não como rejeito ou subproduto.

Por outro lado, a produção de areia artificial (gerada pela britagem de rochas) tem sido realizada por britagem de impacto vertical (VSI – Vertical Shaft Impactor) desde os anos 90. A utilização do VSI é principalmente recomendada para produção de areia de brita tipicamente abaixo de 4,8 (areia grossa) ou 2,4 mm (areia média), por gerar um produto com partículas mais esféricas e arredondadas, conferindo ao concreto melhor trabalhabilidade (Angulo, Chaves *et al.*, 2005). Outro diferencial é o acúmulo de material dentro da própria câmara de britagem, útil para promover o impacto de rocha contra rocha e minimizar o desgaste dos revestimentos (Faço, 1994).

O material alimentado pelo topo da máquina é acelerado pelo rotor atingindo altas velocidades periféricas (até 105 m/s em alguns modelos). Com a utilização, o eixo rotor e a câmara de britagem ficam revestidos por rochas, atuando como uma bomba de pedras a alta velocidade que arremessa um fluxo contínuo de rocha contra rocha. O rotor descarrega continuamente o material em uma cortina de partículas em alta turbulência formada dentro da câmara de britagem onde a cominuição ocorre por impacto, atrito e abrasão de rocha contra rocha (Faço, 1994). Este processo é ilustrado na Figura 4.

As principais vantagens operacionais do britador VSI são os baixos custos de manutenção, a capacidade de se controlar a granulometria do produto sem que ocorra geração de finos excessiva, grande eficiência na liberação e a possibilidade de operação com materiais abrasivos. Por outro lado, a principal desvantagem é o elevado custo inicial (Chaves e Peres, 2006).

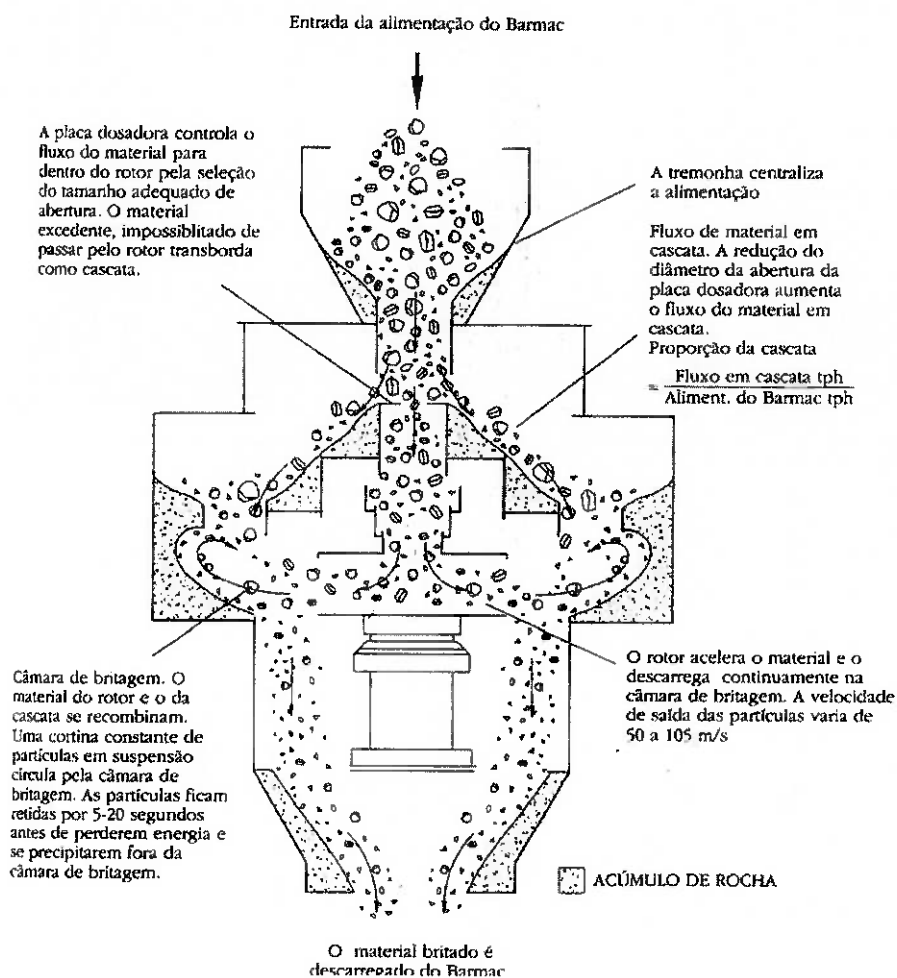


Figura 4 - britador VSI (Faço, 1994)

### 3.6 Caracterização tecnológica

A expressão caracterização tecnológica de matérias primas pressupõe o estudo das propriedades dos materiais tendo em vista as tecnologias usuais de seu processamento e o atendimento às especificações de mercado (Sant'Agostinho e Kahn, 1997).

A caracterização tecnológica é realizada por meio de uma série de ensaios e análises laboratoriais, segundo seqüência de procedimentos e critérios planejados fundamentalmente em função do material em estudo.

#### 3.6.1 Amostragem

A amostragem é a operação de seleção de alíquotas representativas de um grande volume, de maneira que as características do material amostrado (como, por exemplo, distribuição granulométrica, composição química, propriedades físicas, densidade, etc) sejam as mesmas, tanto no todo quanto na parte amostrada (Sampaio e Tavares, 2005). Sendo assim

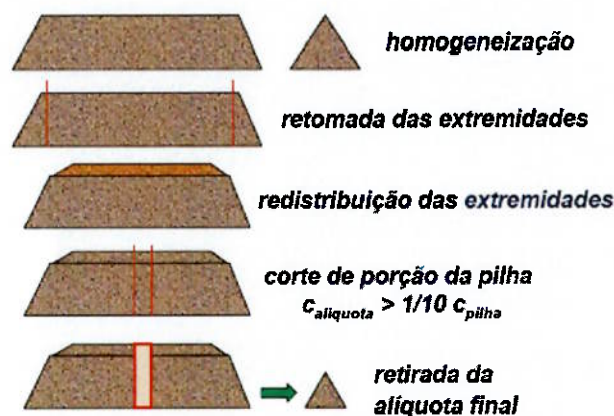


é uma etapa fundamental, pois se não for feita corretamente os dados obtidos do material estudado não corresponderão aos do material original, ou seja, serão pouco representativos.

Para garantir a representatividade da amostragem, utiliza-se normalmente a teoria de Pierre Gy (Petersen, Minkinen *et al.*, 2005) que diz que a representatividade da massa é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas ao cubo ou, mais simplificada, a Tabela de Richards.

Os procedimentos laboratoriais mais utilizados para obtenção de alíquotas representativas são descritos a seguir:

**Amostragem em pilha alongada:** procedimento usualmente empregado para grandes quantidades de amostra ou material com granulação muito grossa. A técnica consiste em distribuir continuamente o material sobre um percurso retilíneo, com comprimento adequado, de modo que o material seja distribuído da esquerda para a direita e vice-versa, até que todo o material tenha sido distribuído. Depois as extremidades da pilha formada são separadas e redistribuídas da mesma maneira. Finalmente, retira-se a alíquota desejada, obedecendo a relação: comprimento da alíquota  $> 1/10$  x comprimento da pilha (Sampaio, França *et al.*, 2007).



Henrique Kahn - notas de aula

Figura 5 – Procedimento de execução de homogeneização e amostragem em pilha alongada

**Amostrador Jones:** procedimento usualmente empregado para reduzidas quantidades de amostra. Nesta técnica o material deve ser colocado na bandeja para alimentação do amostrador de modo que a amostra fique bem distribuída, sem formar pontos de maior acúmulo de material. Na sequência, a amostra deve ser despejada sobre o amostrador, de maneira lenta e contínua, para evitar a obstrução das calhas e a emissão de material particulado. Isso pode ser executado com uma pá cuja dimensão seja a mesma da seção longitudinal do separador ou com um terceiro recipiente coletor da amostra. É necessário que a amostra tenha pouca ou nenhuma umidade e que a abertura entre as calhas seja maior que  $2d + 5$  mm ( $d$  = diâmetro da maior partícula) (Sampaio, França *et al.*, 2007).

### 3.6.2 Separações minerais em líquido denso

Segundo (Burt, 1984), a separação mineral em frações de densidade distintas é uma das técnicas de laboratório mais utilizadas, e tem como objetivos avaliar a aplicabilidade da separação em meio denso, verificar a variação da composição de um mineral, possibilitar a concentração de minerais em baixas concentrações para estudos mineralógicos e análise do grau de liberação do mineral, dentre outros.

A separação em líquido denso baseia-se na capacidade ou não de sedimentação das partículas quando imersas em líquido de uma dada densidade (Sant'Agostinho e Kahn, 1997). A grande vantagem das separações em líquidos densos é a sua eficiência que permite realizar separações próximas da ideal mesmo para uma população de partículas de massas específicas próximas.

A utilização de líquidos orgânicos<sup>2</sup> com densidades de 1,6 até 4,3 g/cm<sup>3</sup> é a técnica mais utilizada. Frente a sua toxicidade, estes têm sido substituídos por sais de tungstênio solúveis em água. Densidades superiores podem ser alcançadas com suspensões densas, compostas de materiais densos micronizados, as quais, entretanto, apresentam problemas de estabilidade e têm uso menos difundido, ou mesmo mediante separação com fluidos paramagnéticos.

Para maior precisão da densidade de corte da separação e a fim de evitar que partículas menores sejam carregadas pelas partículas maiores, o ensaio é realizado em faixas granulométricas estreitas, geralmente obtidas por peneiramento a úmido. Em função da granulação do material, a separação em líquidos densos pode ser feita de três maneiras (Browing, 1961; Parfenoff, Pomerol *et al.*, 1970), para tamanhos de partículas progressivamente decrescentes: em béqueres, em funis de separação e em centrífuga.

### 3.6.3 Absorção de água

A absorção de água é a propriedade que mais diferencia os agregados reciclados dos naturais (Hansen, 1986) e está diretamente relacionada à porosidade do agregado reciclado devido ao teor de argamassa aderida (Chen, Yen *et al.*, 2003). Agregados naturais oriundos de britagem de rochas possuem porosidade muito baixa ou nula, o que implica em baixa ou nenhuma absorção de água. Já os agregados reciclados podem apresentar elevada taxa de absorção em função do teor de pasta de cimento aderida à superfície das partículas (Mehta e Monteiro, 1994).

Maiores porosidades resultarão em menores resistências mecânicas, aumento da absorção de água e consumo de cimento para uma dada resistência, elevando custos e comprometendo a eco-eficiência dos agregados reciclados (Gomez-Soberon, 2002; Poon, Shui *et al.*, 2004).

### 3.6.4 Composição química

Segundo (John, 2003; Angulo, 2003b) a composição química determinada para agregados reciclados é essencial para se avaliar a eficiência do processo de reciclagem. No caso de agregados reciclados é uma técnica que fornece resultados precisos na estimativa dos conteúdos de rocha e pasta de cimento (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009).

Exemplos de técnicas instrumentais mencionadas por (Williams, 1996) para análise química são: espectrometria de absorção atômica (AAS), espectrometria de emissão por plasma de acoplamento indutivo (ICP-OES), espectrometria de massa por plasma de acoplamento indutivo (ICP-MS), análise de ativação neutrônica instrumental (INAA),

---

<sup>2</sup> Líquidos orgânicos densos mais utilizados: bromofórmio (CHBr<sup>3</sup> - 2,89 g/cm<sup>3</sup>), tetrabrometano - TBE (CHBr<sub>2</sub>CHBr<sub>2</sub> - 2,96 g/cm<sup>3</sup>) e di-iodeto de metileno (CH<sub>2</sub>I<sub>2</sub> - 3,32 g/cm<sup>3</sup>).

cromatografia iônica (IC) e espectrometria por fluorescência de raios X (FRX). Dentre estas, as mais comumente empregadas na área de Engenharia Mineral são FRX, AAS e ICP-OES.

Na técnica de fluorescência de raios X, a amostra é irradiada por raios X excitando os elementos químicos em geral ( $Z > 4$ ), os quais emitem uma radiação com energia característica e intensidades proporcionais às suas concentrações. Para análise quantitativa são necessários procedimentos de calibração e comparação com padrões, podendo-se fazer uso de espectrômetros com detector de comprimento de onda (WDS) ou de energia dispersiva (EDS).

### 3.6.5 Caracterização microestrutural

#### 3.6.5.1 Microscopia estereoscópica

O microscópio estereoscópico é um equipamento binocular, que opera usualmente com aumentos inferiores a 100x possibilitando uma visualização tridimensional (estereoscópica) de áreas relativamente extensas.

Através de observações ao microscópio estereoscópico é possível realizar uma análise qualitativa da associação entre pasta de cimento e agregados, além de permitir observações referentes à rugosidade superficial, arredondamento de partículas e liberação da pasta em função das classes de densidade e da redução do tamanho de partículas.

#### 3.6.5.2 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica de caracterização microestrutural extremamente versátil na qual a interação de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área ou o microvolume de amostra, produz uma série de sinais que podem gerar imagens, as quais são utilizadas para caracterizar propriedades da amostra, tais como sua composição, superfície topográfica, cristalografia, etc. (Goldstein, Newbury *et al.*, 1992).

Trabalhos em andamento tem utilizado o MEV na quantificação da pasta de cimento aderida às areias produzidas a partir de RCD, como ferramenta de avaliação da qualidade de produtos gerados mediante diferentes alternativas de processamento.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da fração areia de RCD de diferentes origens

A origem e as características das amostras variam de cidade a cidade, a isso denomina-se “variabilidade dos resíduos de construção e demolição”, conforme avaliado por Angulo (Angulo, 2000). Assim, o estudo de RCD de diferentes origens é importante para se obter as características de cada amostra, de cada sistema construtivo local e também para avaliar a sua variabilidade e potencialidade na reciclagem. Para tanto, a caracterização foi conduzida em amostras coletadas de diferentes regiões do país.

Os resultados apresentados referem-se aos estudos conduzidos em areias provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) de três cidades: São Paulo, Macaé e Maceió; sendo este estudo parte do contexto do projeto “Aperfeiçoamento do processo de reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição”, financiado pela FINEP, convênio 150.614/2005-5 em uma parceria entre a Escola Politécnica da USP (Poli-USP), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e a Universidade



Federal de Alagoas (UFAL). Serão também apresentados dados comparativos de amostras oriundas da demolição de um edifício na cidade do Rio de Janeiro.

A amostragem primária foi realizada pela equipe de profissionais das instituições envolvidas e foi inteiramente discutido nos relatórios de pesquisa do convênio. Foram coletadas no total 59 toneladas de RCD, distribuídos em 130 amostras: 52 de São Paulo, totalizando 20 toneladas; 51 de Macaé, totalizando 22 toneladas; 27 de Maceió, totalizando 17 toneladas. A amostragem do edifício no Rio de Janeiro totalizou cerca de 20 toneladas.

O procedimento de caracterização da fração areia desses produtos foi realizada com o intuito de levantar as principais características do material; assim, foram analisadas quanto aos parâmetros:

- *distribuição granulométrica*: determinada por peneiramento a úmido (fração <4,8 mm)
- *separação em líquido denso*: avaliação das distribuições em massa nos produtos de densidades de 2,2 a 2,64 g/cm<sup>3</sup>.

## **4.2 Caracterização e processamento de RCD da região do ABC-São Paulo**

### **4.2.1 Amostragem e preparação de amostras**

Os resíduos da região da grande São Paulo, no ABC, foram coletados na usina de processamento URBEM Tecnologia Ambiental<sup>3</sup>, que recebe resíduos de construção e demolição, majoritariamente de concreto, de diversos pontos da cidade.

As operações unitárias empregadas na usina são: remoção da fração abaixo de 4,8 mm por uma grelha, cominuição em britador de impacto (top-size de 150 mm), seleção manual (ou catação) para remoção de contaminantes remanescentes (madeira, papel, plástico, vidro, etc), separação magnética (extrator de sucata), e peneiramento a seco. Os produtos obtidos e comercializados são:

- Rachão: + 50 mm;
- Brita: - 50 mm + 4,8 mm;
- Areia: -4,8 mm;
- Finos Naturais: -4,8mm (estes são retirados antes da britagem).

Uma visão geral da usina é ilustrada na Figura 6a e o detalhe do sistema grelha+britador de impacto na Figura 6b.

---

<sup>3</sup> [www.urbem.com.br](http://www.urbem.com.br)



(a) vista geral da usina



(b) detalhe do britador de impacto

Figura 6 - Usina de reciclagem URBEM

Para uma boa representatividade, foram feitas amostragens sistemáticas de cada produto por 60 dias alternados e selecionados aleatoriamente, duas vezes por semana. A massa total de material amostrado foi de 3,9 toneladas.

As amostras foram coletadas nas pilhas de produtos e compostas segundo a proporção em volume em que são geradas, de modo a se obter um material tal como alimentado à usina, sendo as proporções: 5 rachão: 3 areia de britagem: 2 finos naturais: 2 brita. Na sequência, o material foi transportado à USP para as atividades laboratoriais.

#### 4.2.2 Produção de areia

A amostra coletada na usina de reciclagem URBEM foi integralmente britada em britador de mandíbulas abaixo de 3/4" (19,1 mm) em circuito fechado com peneira. Uma alíquota deste produto foi amostrada e reservada para os estudos de caracterização; esse produto foi denominado ABC-tal qual grão ou ABC-areia (no caso da fração <4,8mm da britagem secundária).

Na sequência todo o material passou por uma etapa de britagem terciária em um britador de impacto vertical (VSI Barmac 3000). A operação foi realizada no Centro de Tecnologia de Processos (CTP) da empresa fabricante do equipamento Metso, localizada em Sorocaba (Figura 7).

A britagem em VSI foi realizada em circuito fechado com peneira de 3 mm, em que o material é alimentado ao britador e depois peneirado. O material retido na peneira é realimentado junto com a amostra inicial ao britador. Isto se repete até que todo o material possua granulometria passante em 3 mm.

Considerando que a velocidade de rotação do rotor é a principal variável na característica do produto obtido, interferindo diretamente na distribuição granulométrica e na morfologia das partículas (Bengtsson e Evertsson, 2006), os ensaios de britagem foram realizados em duas velocidades distintas de rotação, sendo, respectivamente, 55 e 75 m/s. O produto obtido, com dimensão máxima de 3 mm, foi denominado de "VSI-55 e VSI-75".



a) Usina de testes piloto na Metso



b) Detalhe do circuito fechado com peneira

Figura 7 - Centro de Tecnologia de Processos da Metso

### 4.2.3 Caracterização tecnológica

O produto foi denominado ABC-tal qual, resultante da britagem secundária abaixo de 19,1 mm foi caracterizado do ponto de vista de:

- *separação em líquido denso*: avaliação das distribuições em massa nos produtos de densidades de 2,2 a 2,64 g/cm<sup>3</sup>;
- *composição química*: análise dos principais óxidos presentes; determinados por fluorescência de raios X em pastilhas fundidas.

A caracterização dos produtos ABC-areia, VSI-55 e VSI-75 envolveu análise granulométrica, separação em líquidos densos, absorção de água, determinação da composição química e observações qualitativas ao microscópio.

#### 4.2.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento a úmido em telas de aberturas nominais de 4,8 a 0,075 mm.

#### 4.2.3.2 Separação em líquidos densos

O procedimento para os ensaios de separação em líquidos densos é apresentado na Figura 8. A separação do material foi realizada em etapas, começando com líquidos com densidades menores. A densidade dos líquidos foi aumentando progressivamente a cada separação, obtendo-se, ao final, a separação da amostra dentro das faixas de densidades desejadas.

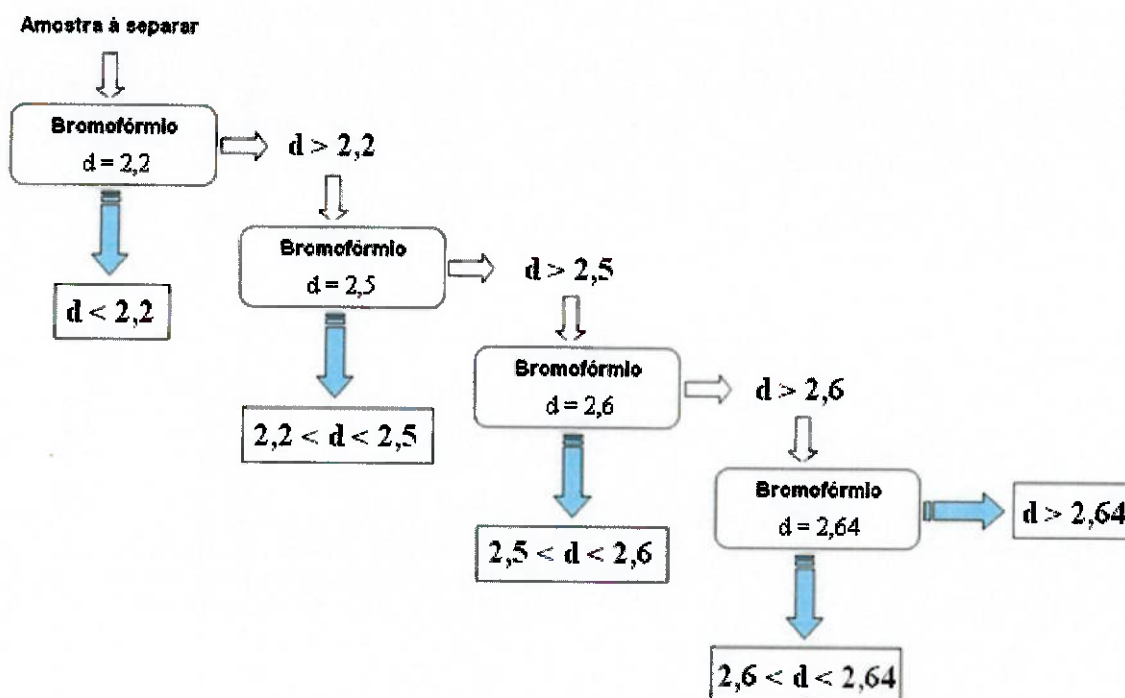


Figura 8 - Procedimento empregado na separação em líquido denso

#### 4.2.3.3 Absorção de água

A absorção de água de agregados miúdos foi realizada segundo procedimento descrito pela norma ABNT (NBR NM 30). O experimento consiste em deixar a amostra totalmente submersa em água por 24h para que todos os poros acessíveis da amostra sejam preenchidos por água. Após este tempo, retira-se a água em excesso e com uma leve corrente de ar seca-se a superfície da amostra até que esta atinja a condição de superfície saturada seca (SSS).

Para indicar a condição de SSS, é utilizado um tronco-cônico metálico, segundo as especificações da norma. A amostra é colocada no tronco-cônico e golpeada suavemente 25 vezes. Se, após a remoção do tronco-cônico, o cone de amostra não desmoronar, então se deve prosseguir com a secagem; se desmoronar significa que a amostra está na condição desejada (SSS). Anota-se esta massa ( $m_{SSS}$ ). Em seguida a amostra deve ser seca em estufa a 105°C por 24 horas. Anota-se a massa da amostra seca ( $m$ ) e determina-se a absorção de água conforme a equação:

$$A = \frac{m_{SSS} - m}{m} \times 100$$

onde,  $A$ , é absorção de água, em porcentagem,  $m_{SSS}$ , é a massa da amostra em condição saturada de superfície seca,  $m$ , é a massa da amostra seca em estufa

Equação 1 - Determinação da absorção de água

#### 4.2.3.4 Análise química

Para a determinação da composição química das amostras, estas foram pulverizadas e então fundidas em botões, sendo então enviada para espectrometria por fluorescência de raios X em espectrômetro Axios, marca PANalytical.

O objetivo foi determinar a composição dos produtos, com destaque ao teor de CaO e análise de perda por calcinação a 1.050°C. A soma do teor de CaO com a perda ao fogo tem estrita correlação com o teor de pasta de aglomerantes (Angulo et al., 2009), que indica a presença de pasta de cimento de construções anteriores.

#### 4.2.3.5 *Caracterização microestrutural*

Alguns produtos gerados foram selecionados para observações em lupa estereoscópica, a fim de se realizar uma análise qualitativa da associação entre pasta de cimento e agregados, além de permitir observações referentes à rugosidade superficial, arredondamento de partículas e liberação da pasta em função das classes de densidade e da redução do tamanho de partículas.

Foram também realizadas observações preliminares dos produtos em microscópio eletrônico de varredura, modelo Quanta 600 FEG, equipado com sistema de microanálise por EDS Quantax 4030 (tecnologia SDD, silicon drift detector), marca Bruker. O objetivo foi avaliar qualitativamente as associações da pasta de cimento e verificar a possibilidade de se estabelecer uma rotina de análise por MEV para estudos de liberação da pasta de cimentos dos agregados.

Nesse projeto, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura de elétrons Quanta 600 FEG, equipado com sistema de microanálise por EDS Quantax 4030 (tecnologia SDD, silicon drift detector), marca Bruker.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Características gerais das amostras

Como resultados da caracterização das amostras totais, ficou novamente demonstrada a variabilidade dos resíduos. Em São Paulo aproximadamente 50% dos resíduos é de origem de concretos ou rocha e 60% das amostras estão dentro dos limites dos contaminantes. Em contrapartida, na cidade de Macaé, apenas 18% dos lotes amostrados são de origem de concretos e a maior parte está contaminada por plásticos, madeiras, solos e alguns ainda com gesso e cimento com amianto. Já na cidade de Maceió quase todos resíduos são provenientes de construções (Relatórios FINEP).

As amostras de São Paulo, Macaé e Maceió foram divididas em duas classes: grande quantidade de material cerâmico (AC - elevada concentração de material com densidade inferior a 2,2 g/cm<sup>3</sup>) e baixa quantidade de material cerâmico (BC - baixa concentração de material com densidade inferior a 2,2 g/cm<sup>3</sup>). As classes foram definidas segundo a proporção de material da fração graúda (-25,4+4,8 mm) do resíduo no produto afundado em 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Os valores diferem para cada cidade tendo em vista a diferença de composição e origem do material, sendo o material com baixa cerâmica (BC) para Macaé, São Paulo e Maceió, respectivamente: 48%, 79% e 26%, evidenciando que dos três resíduos, o de São Paulo apresenta maior quantidade de material de baixa porosidade, enquanto que em Maceió apenas 2% dos resíduos caracterizado é de baixa porosidade.

A proporção de materiais de alta densidade varia de cidade a cidade, tendo em vista a variação das características citadas acima. Esta variação está apresentada na Tabela 1. Ao todo foram analisadas 18 amostras de areias recicladas com aproximadamente 50 kg de cada amostra.



Tabela 1 – Proporção de materiais de alta densidade em cada qualidade de amostra

Material com $d > 2,2$	Recuperação em massa no produto (%)		
	São Paulo	Macaé	Maceió
Baixa cerâmica (BC)	79	48	26
Alta cerâmica (AC)	10	9	2

### 5.1.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica das diversas areias caracterizadas e de outras areias cujos resultados são apresentados por Angulo e colaboradores (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009) é apresentada na Figura 9.

Verifica-se que apesar da variabilidade das amostras e suas diferentes origens e métodos construtivos, há uma semelhança entre os resíduos com baixo conteúdo de cerâmicas (resíduos de concreto), com distribuição mais grossa que os de alta cerâmica (resíduos mistos).

A proporção de material abaixo de 0,15 mm varia de cerca de 9 a 12% para os materiais com AC, enquanto que para os BC esse valor sobre para 15 a 20%.

Comparando-se com as areias da ABNT, verifica-se que as areias de RCD geradas após britagem primária, estão entre os limites de uma areia grossa a média. Para a adequação da granulometria às especificações da norma, um segundo estágio de britagem é necessário, assim como a remoção dos finos (abaixo de 0,15 mm).

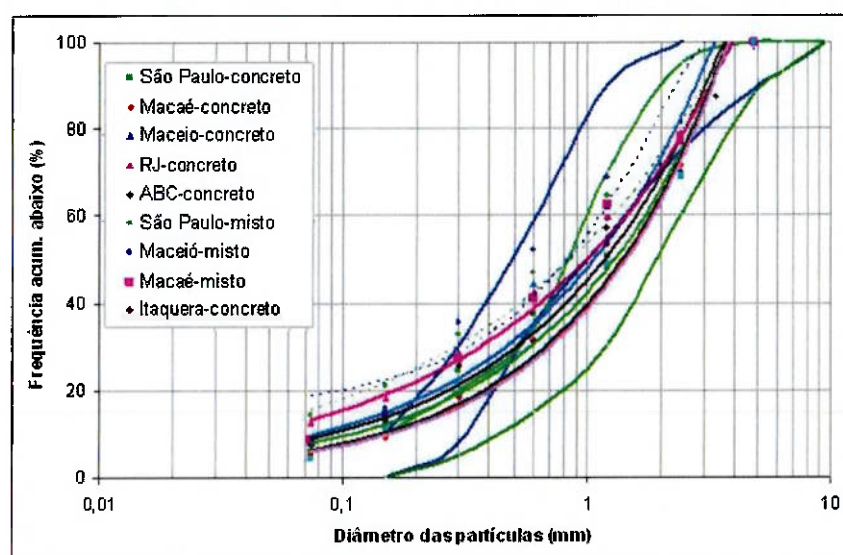


Figura 9 – Distribuição granulométrica de areias recicladas e areia ABNT

### 5.1.2 Distribuição por intervalo de densidade

Os resultados obtidos para a amostra ABC/São Paulo indicam que uma parcela expressiva dos agregados miúdos tem massa específica média superior a  $2,2 \text{ g/cm}^3$  (mais de 80% em massa da amostra), e que a parcela de material com massa específica maior que  $2,5 \text{ g/cm}^3$  tende a aumentar com a redução do tamanho das partículas (Figura 10).

O aumento da recuperação das amostras em  $d > 2,5$  é ainda mais sensível se comparado à distribuição granulométrica total da amostra, desde a fração graúda ( $-25,4+4,8\text{mm}$ ) até a fração miúda ( $-4,8+0,074\text{mm}$ ), conforme exposto na Figura 10.

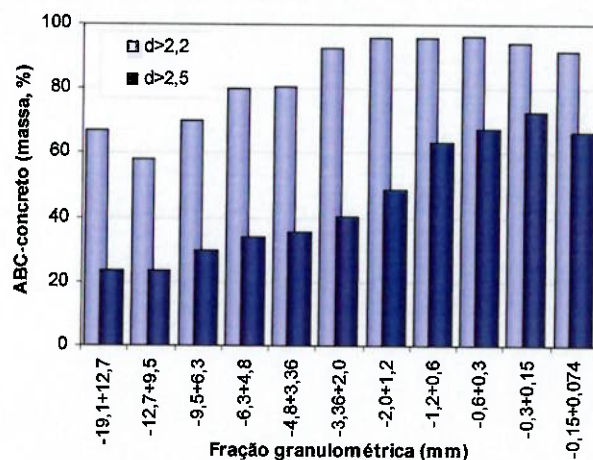
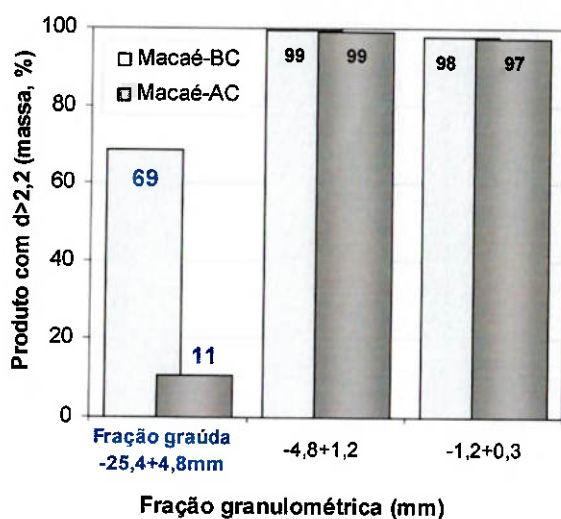
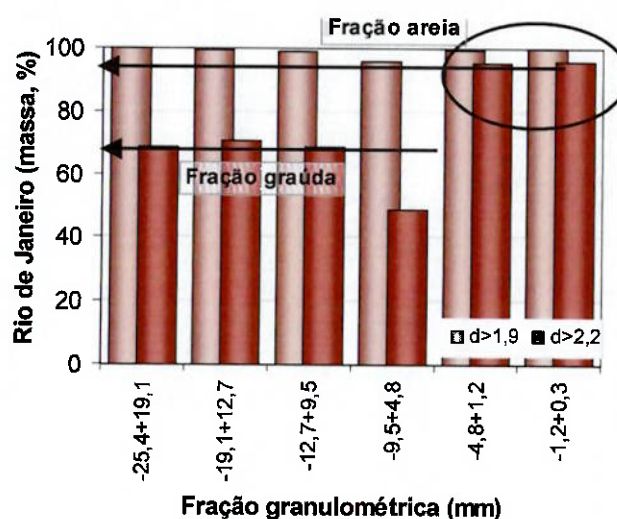


Figura 10 – Distribuição de massa por intervalo de densidade

O mesmo ensaio conduzido nas amostras de Macaé e Rio de Janeiro comprovam que a metodologia é válida independente da origem e características da amostra (Figura 11).



(a) RCD de Macaé



(b) RCD do Rio de Janeiro

Figura 11 – Distribuição de massa por intervalo de densidade

Este estudo comprovou os experimentos publicados por Ulsen (Ulsen, 2006), que estudou a separabilidade de agregados reciclados de duas localidades do estado de São Paulo, obtendo conclusões semelhantes: “a separabilidade aumenta nas frações mais finas, em virtude da liberação da pasta de cimento das rochas naturais”.

Os resultados permitem concluir que as frações granulométricas mais finas são constituídas de material por materiais de maior massa específica aparente, e logo, menor porosidade. Dessa forma, fica claro que a qualidade da areia reciclada é superior ao da fração graúda (brita) reciclada, segundo este parâmetro.

Essa informação é particularmente importante, pois a areia reciclada tem pouco espaço no mercado de reciclados por se acreditar que possui características inferiores à da brita, no entanto alguns trabalhos anteriormente publicados já consideram a areia como um possível produto da reciclagem (Miranda, 2005; Ulsen, 2006).

### 5.1.3 Composição química

Os resultados da análise química da amostra ABC-concreto são apresentados na Tabela 2 do APÊNDICE I. Com esses resultados pode-se montar uma correlação com a soma dos teores dos principais elementos constituintes das rochas, principalmente  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009), os quais também confirmam a separabilidade das frações mais finas, especialmente abaixo de 2,0 mm (Figura 12). O comportamento da fração -0,15+0,074 mm é diferente das demais frações em função dos argilominerais presentes nos finos, tal como comprovado por Ângulo (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009).

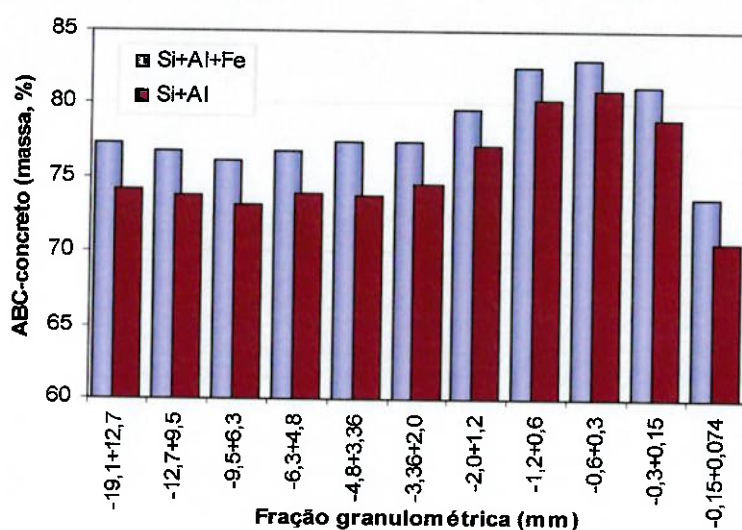


Figura 12 – Principais óxidos presentes em cada intervalo de densidade

## 5.2 Caracterização das areia reciclada por britagem terciária, amostra ABC-Urbem

Os resultados da caracterização dos produtos resultantes da britagem terciária das amostras de RCD (amostras VSI-55 e VSI-75) são apresentados na sequência; os resultados são também comparados aos resultados da areia da britagem secundária (amostra ABC-areia).

A distribuição granulométrica das amostras apresentadas na Figura 13 mostra que, comparativamente à fração areia do produto de britagem secundária, a britagem terciária não gerou um acréscimo significativo na proporção de finos. Dessa forma conclui-se que a britagem terciária abaixo de 3 mm gera um produto com distribuição granulométrica bastante semelhante à fração areia presente no produto de britagem secundária abaixo de 19 mm.



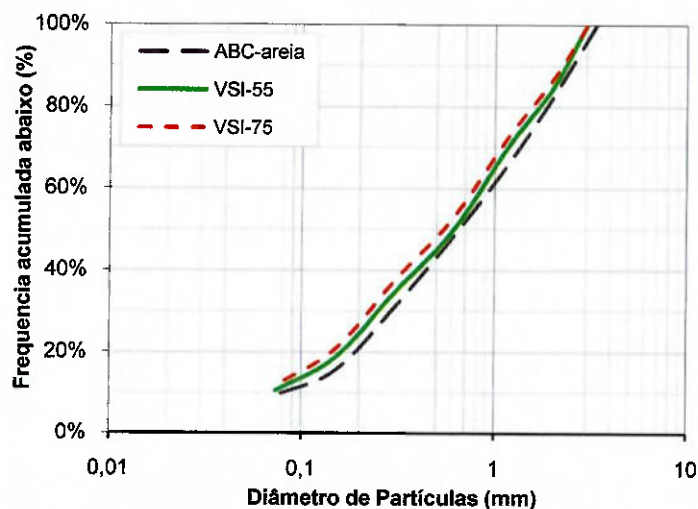


Figura 13 - Distribuição granulométrica das amostras

A distribuição em massa no produto afundado em  $2,6 \text{ g/cm}^3$  é apresentada na Figura 14 e mostram os resultados comparativos da fração areia da amostra ABC-Urbem, considerando a areia resultante da britagem secundária (ABC-areia) e produzida na própria usina e da areia produzida pela britagem terciária (VSI).

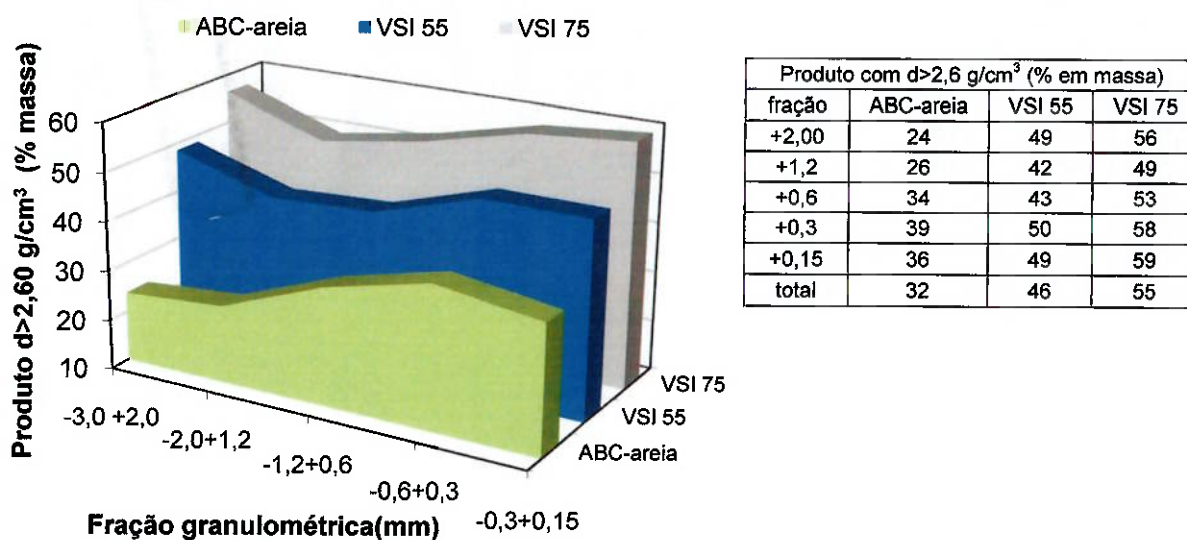


Figura 14 - Distribuição em massa no produto  $d > 2,6$  da separação em líquido denso

Comparativamente, verifica-se que a proporção em massa com densidade acima de  $2,60 \text{ g/cm}^3$  é significativamente maior na areia de VSI do que na areia de RCD, demonstrando que o processamento aplicado foi eficiente para reduzir a porosidade destes agregados. Além disso, a britagem com velocidade do rotor de  $75 \text{ m/s}$  gera um produto com menor porosidade do que com  $55 \text{ m/s}$ , demonstrando a interferência da velocidade na qualidade do produto final.

Analogamente, os resultados da absorção de água para os mesmos produtos são apresentados na Figura 15. O objetivo de ambos os procedimentos foi avaliar se houve

Dessa forma constata-se que a britagem tem influência notória na redução da porosidade do produto gerado, pois incorpora em sua composição a fração de brita que foi cominuída no processo de britagem em VSI.

A Figura 17 mostra o aspecto macroscópico de areias processadas em britador de impacto vertical seguido de separação em líquidos densos, comparativamente às areias fluviais quartzosas apresentadas na Figura 18a e às areias produzidas nas usinas de reciclagem atuais na Figura 18b.

A areia fluvial caracteriza-se por sua composição majoritariamente quartzosa, ausência ou de contaminantes orgânicos (madeira, plástico, papel, etc) e partículas em geral com forma arredondada. Já a areia produzida em usinas de reciclagem atuais apresenta uma forte associação do material virgem (areia natural) com a pasta de cimento endurecida e resultante de construções anteriores, além de formato irregular de partículas. Por outro lado, a areia que passou pela britagem terciária, seguida de separação em líquido denso, mostra que é possível melhorar a qualidade da areia por meio de beneficiamento mineral.

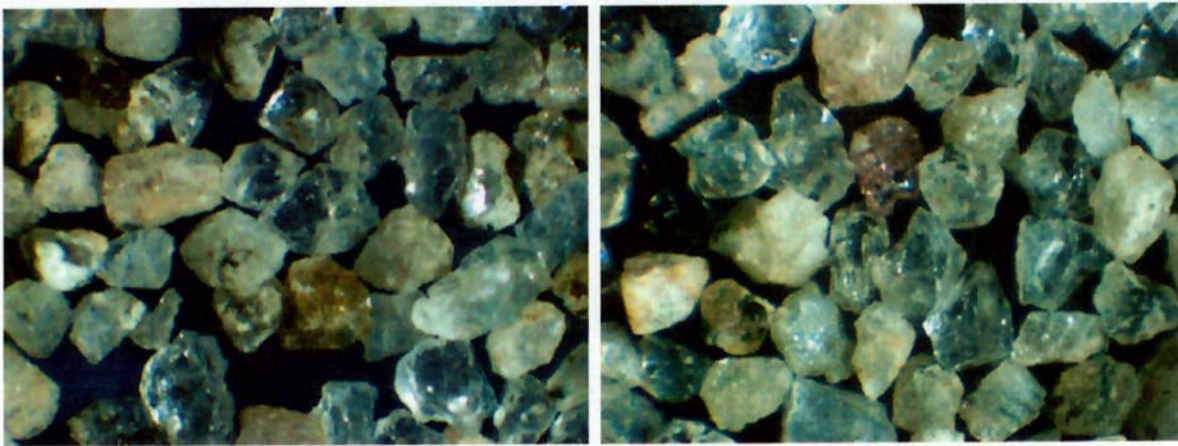
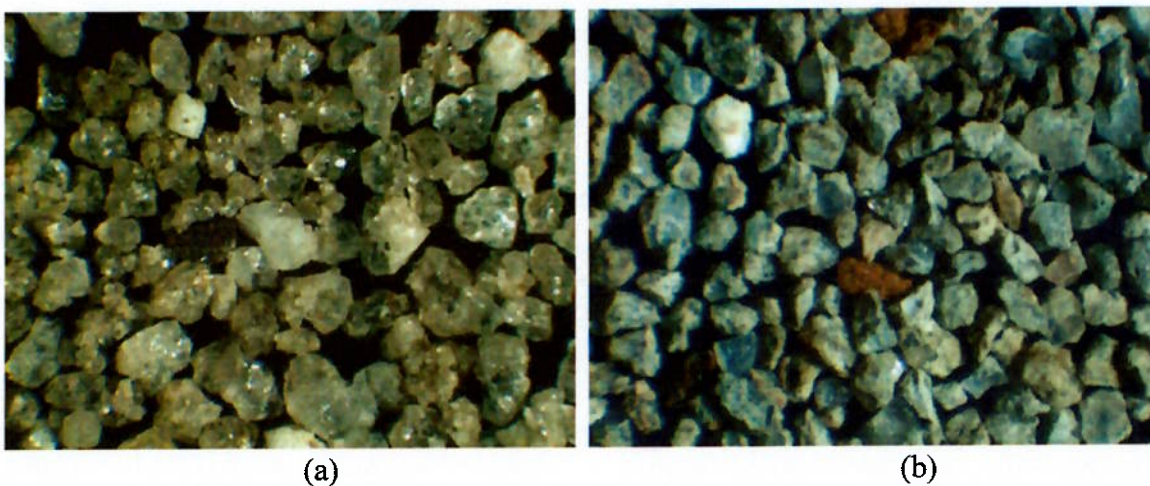


Figura 17 – Areia reciclada por britagem terciária, produto  $d > 2,6$



(a)

(b)

Figura 18 – Areia fluvial quartzosa (a) e areia de RCD tradicional (b)

Imagens ilustrativas obtidas das análises por microscopia eletrônica de varredura da fração  $-1,2+0,60$  mm são apresentadas na Figura 19 e comparam a areia presente no RCD com a mesma fração granulométrica da areia gerada por britagem em VSI.



Na imagem de elétrons retroespalhados (BSE), o tom de cinza mais claro representa os fragmentos de cerâmica e feldspatos, cinza intermediária representa o quartzo e a pasta de cimento é representado por cinza escuro. No mapeamento de raio-X, o quartzo é representado pela cor azul, cimento pela cor magenta e os feldspatos pela cor laranja.

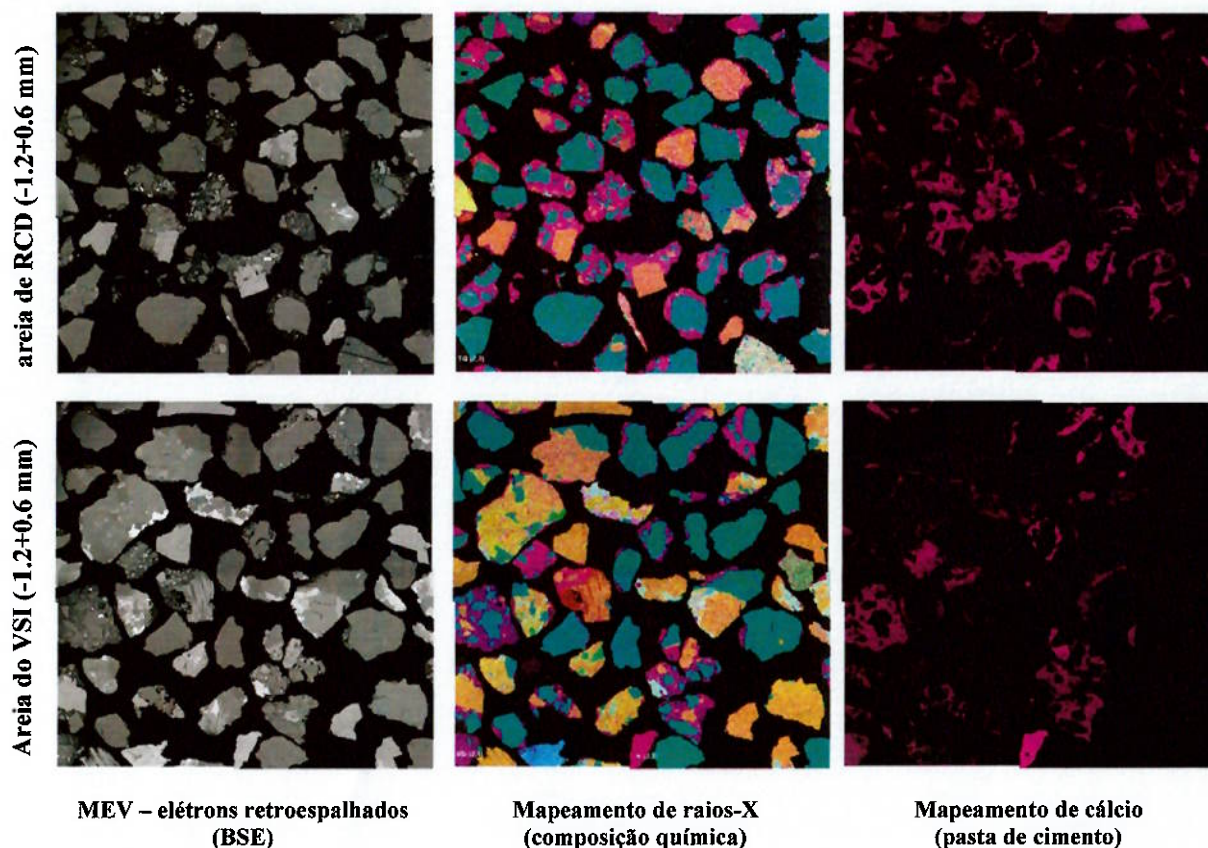


Figura 19 – Imagens obtidas ao MEV por elétrons retroespalhados e mapeamento de raios X

Na areia de RCD, a pasta de cimento aparece aderida à superfície das partículas ou interligando pequenos grãos de quartzo (areia). Já a areia produzida a partir da britagem do RCD possui um elevado teor de rocha natural fragmentada (sem pasta de cimento), comprovada pelo aumento da proporção de feldspatos e quartzo liberado. A diminuição dos teores de pasta de cimento junto à superfície dos agregados também é notável.

Os agregados com pequenos grãos de quartzo (areia) observados na areia de RCD também estão presentes na areia do VSI, indicando que a fragmentação/liberação não é plenamente atingida para essa fração granulométrica, ou que somente a britagem não é suficiente para liberar a areia de quartzo mais fina.

redução na porosidade na areia gerada pelo VSI, em comparação à areia da britagem secundária.

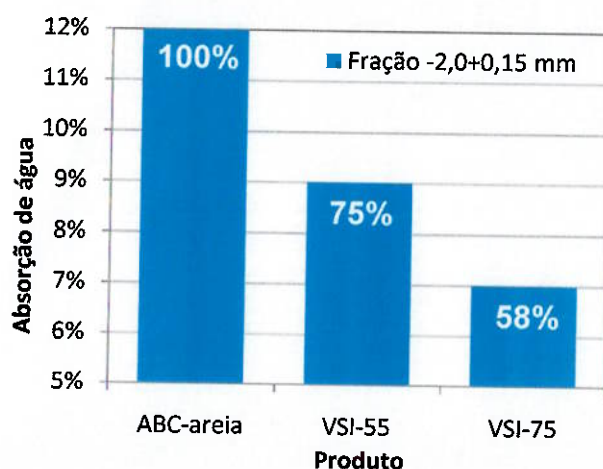


Figura 15 - Absorção de água

Da mesma forma, a areia produzida pela britagem em VSI apresenta claramente menores valores de absorção de água em relação à fração areia produzida atualmente na usina (ABC-areia). Tal como demonstrado pela separação em líquido denso, os valores de absorção de água para os produtos gerados com velocidade de rotor de 75 m/s são menores do que para os produtos com velocidade de 55 m/s, mais uma vez demonstrando a influência da velocidade da qualidade do produto.

Os resultados da análise química para as amostras VSI-55 e VSI-75 são apresentadas no APÊNDICE I (Tabela 3 e Tabela 4). A Figura 16 mostra a correlação entre os principais óxidos com o teor de CaO mais perda ao fogo ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ )/(CaO+PF) - quanto maior a relação, menor o conteúdo de pasta de cimento remanescente), relativo a pasta de cimento (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009). Assim, os resultados apresentados também demonstram que há uma tendência de redução da pasta de cimento porosa nas frações abaixo de 1,2 mm e acima de 0,15 mm; isso se deve, portanto, à liberação mais evidente nestas frações.

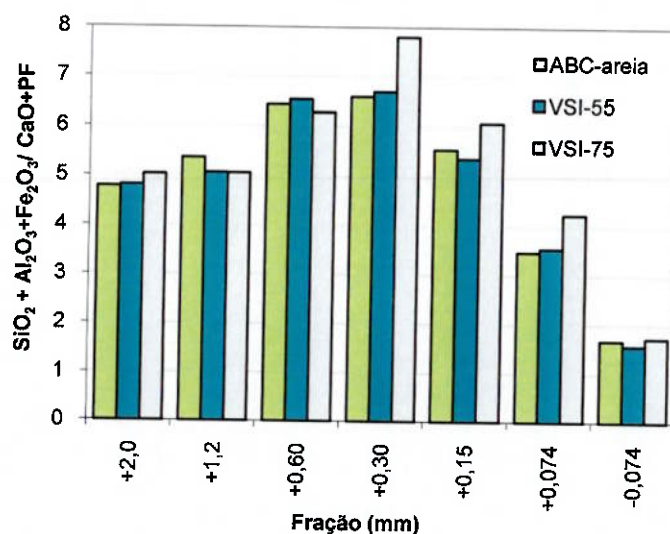


Figura 16 - Correlação entre os teores dos principais elementos na amostra

## 6 CONCLUSÕES

Os estudos de separabilidade por líquido denso comprovaram os experimentos publicados anteriormente por Ulsen (Ulsen, 2006), que estudou a separabilidade de agregados reciclados de duas localidades do estado de São Paulo, obtendo conclusões semelhantes: “*a separabilidade aumenta nas frações mais finas, em virtude da liberação da pasta de cimento das rochas naturais*”.

Adicionalmente, os teores dos elementos constituintes das rochas, confirmam a separabilidade das frações mais finas, especialmente abaixo de 2,0 mm. O comportamento da fração -0,15+0,074 mm é diferente das demais frações em função dos argilominerais presentes nos finos, tal como comprovado por Ângulo (Ângulo, Ulsen *et al.*, 2009).

Comparando-se as areias de RCD geradas após britagem primária com as areias da ABNT, verifica-se que estas estão entre os limites de uma areia grossa a média. Para a adequação da granulometria às especificações da norma, um segundo estágio de britagem é necessário, assim como a remoção dos finos (abaixo de 0,15 mm).

O ensaio de britagem terciária em VSI mostrou-se eficiente, uma vez que a proporção de massa com densidade acima de  $2,60 \text{ g/cm}^3$  é significativamente maior na areia de VSI do que na areia de RCD. A análise dos teores dos principais óxidos presentes na amostra, juntamente com os dados de absorção de água e as imagens obtidas ao microscópio estereoscópico e ao MEV demonstram que a britagem em VSI provocou a liberação de grande parte da pasta de cimento aderida e o arredondamento das partículas. Além disso, a areia de VSI-75 apresentou qualidades superiores a da areia VSI-55, mostrando que a velocidade de rotação do britador VSI tem grande influência na qualidade do material.

Sendo assim, os resultados demonstram que o processamento aplicado foi eficiente para reduzir a porosidade destes agregados melhorando a qualidade da areia reciclada e aumentando seu potencial para aplicações mais nobres.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ABNT NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. 1997.

\_\_\_\_\_. NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. 2001.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 9935 - Agregados - Terminologia. 2005.

ALMEIDA, S. L. M.; SILVA, V. S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. II SUFFIB – o uso da fração fina da britagem. São Paulo 2005.

ÂNGULO, S. C. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. (2000). 155 f. (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

\_\_\_\_\_. *Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD*. In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, São Paulo. IBRACON/IPEN, 2002a. p.293-307.

\_\_\_\_\_. *Construction and demolition waste management in Brazil*. *Waste Management World*. London2003b. p. 54-57.

\_\_\_\_\_. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento dos concretos*. (2005). 149 f. (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. *et al.* *Análise comparativa da tecnologia de usina na reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição*. XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME). Natal2005. p. 305-312.

\_\_\_\_\_. Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from Sao Paulo, Brazil. *Waste Management [S.l.]*, v. 29, n. 2, p. 721-730, 2009.

BENGTTSSON, M.; EVERTSSON, C. M. Measuring characteristics of aggregate material from vertical shaft impact crushers. *Minerals Engineering [S.l.]*, v. 19, n. 15, p. 1479-1486, 2006.

BROWING, J. S. *Heavy liquids and procedures for laboratory separation of minerals*. . Washington: USBM, 1961.

BURT, R. O. *Gravity concentration technology*. Amsterdam: Elsevier, 1984.

CARRIJO, P. M. *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. (2005). 129 f. (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. *Britagem, peneiramento e moagem*. 3. ed. São Paulo: Editora Signus, 2006.

CHEN, H. J. *et al.* Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research [S.l.]*, v. 33, n. 1, p. 125-132, 2003.

COELHO, J. M. The minning of aggregates in Metropolitan Region of São Paulo. *Mining, Minerals and Sustainable development (MMSD) report*. n. 121: IIED/WBCSD, 2001. p. 11.

CONAMA. *Resolução no 307*. In: CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, M. D. C., SECRETARIA NACIONAL DA HABITAÇÃO (Ed.): Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/02, 2002.

FAÇO. Manual de britagem FAÇO. In: PAULISTA, A. M. S. F. D. A. (Ed.)1994.

GOLDSTEIN, J. *et al.* *Scanning electron microscopy and X-ray analysis*. 2. ed. New York: Plenum Press, 1992.

GOMEZ-SOBERON, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study. *Cement and Concrete Research [S.l.]*, v. 32, n. 8, p. 1301-1311, 2002.

HANSEN, T. C. The second RILEM state of the art report on recycled aggregates and recycled aggregate concrete. *Materials and Structures* [S.l.], v. 1, n. 111, p. 201-204, 1986.

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

HOBBS, G.; HURLEY, J. Deconstruction and reuse of construction materials. In: CHINI, A. R. (Ed.). *CIB Publication 266*. Florida 2001. p. 98-124.

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

\_\_\_\_\_. Sobre a necessidade de uma metodologia de pesquisa e desenvolvimento para a reciclagem. In: Fórum das Universidades Públicas Paulistas – Ciência e Tecnologia em resíduos, Riberão Preto. USP/ UNICAMP/UNESP/UFSCAR/IPT/IPEN, 2003.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. Agregados para a construção civil. *DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral*: [https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4008](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4008), 2009. p. 34.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

MIRANDA, L. F. R. *Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe-A da construção civil*. (2005). 439 f. (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PARFENOFF, A. *et al.* *Les minéraux en grains; méthodes d'étude et détermination*. 6. ed. Paris: Dunod, 1970.

PETERSEN, L. *et al.* Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* [S.l.], v. 77, n. 1-2, p. 261-277, 2005.

POON, C. S. *et al.* Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials* [S.l.], v. 16, n. 5, p. 281-289, 2002.

\_\_\_\_\_. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research* [S.l.], v. 34, n. 1, p. 31-36, 2004.

RANGEL, A. S. *et al.* *Padrão de concorrência e competitividade da indústria de materiais de construção*. São Paulo: Singular, 1997.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. *Beneficiamento Gravimétrico*. 1. ed.: Editora UFRGS, 2005.

SAMPAIO, J. A. *et al.* *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SANT'AGOSTINHO, L. M.; KAHN, H. *Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais*. (1997). 29 f. (Boletim técnico) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

ULSEN, C. *Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição*. (2006). 171 f. (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ULSEN, C., HAWLITSCHKE, G., KAHN, H., ANGULO, S.C. AND JOHN, V.M. Technological Characterization of Fine Fraction from C&D Waste. In: Progress of Recycling in the Built Environment, São Paulo. *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (no prelo)*, 2010. p.11.

ULSEN, C. *et al.* Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição (RCD). *Brasil Mineral*. n. 2422005. p. 154-162.

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

WILLIAMS, C. T. *Analysis of rare earth minerals*. London: Chapman & Hall, 1996. (The Mineralogical Society Series).

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



