

VINICIUS OLIVEIRA LEPECHUKA

**PRODUÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE BAIXA
POROSIDADE EM JIGUE DE ESTRATIFICAÇÃO LABORATORIAL**

**São Paulo
2013**

VINICIUS OLIVEIRA LEPECHUKA

**PRODUÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE BAIXA
POROSIDADE EM JIGUE DE ESTRATIFICAÇÃO LABORATORIAL**

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: Profa. Dra. Carina Ulsen

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio C. Angulo

**São Paulo
2013**

TF-2013

L556 p

sympo 2449845

H2013j

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009721

FICHA CATALOGRÁFICA

Lepechuka, Vinicius Oliveira

Produção de agregados graúdos reciclados de baixa porosidade em jigue de estratificação laboratorial / V.O. Lepechuka. -- São Paulo, 2013.

36 p.

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

1. Agregados 2. Resíduos de construção (Reciclagem) 3. Métodos gravíticos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

RESUMO

A indústria da construção civil destaca-se como parte vital para desenvolvimento de um país. Esse ramo movimentava a economia ao entregar seus produtos, e para tanto faz uso de insumo e gera rejeitos, impactando direta e indiretamente diversos setores. Os agregados são matérias primas com notada importância para a construção, dado o seu indispensável uso para a confecção de cimentos e concretos. Estes mesmos materiais são descartados como resíduos de construções e demolições. Se por um lado este ciclo apresenta uma tendência de crescimento de extração e esgotamento de áreas apropriadas para descarte quando o setor está aquecido, por outro, lança mão para uma indústria de reciclagem que atuaria em ambas as pontas da cadeia produtiva.

Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam uma grande parte de todo resíduo sólido gerado no mundo. Grande parte deste RCD, por ser de origem mineral, pode ser reciclado, através de processos de beneficiamento mineral, e então reutilizados como materiais de construção. Para se alcançar elevadas taxas de reciclagem, devem ser considerados processos que levem à obtenção de agregados reciclados com características semelhantes às do natural, realizados através de operações unitárias de tratamento de minérios com acurado controle das propriedades dos produtos gerados.

O programa experimental apresentado envolveu inicialmente a coleta de amostras de resíduos de construção e demolição da Usina de Reciclagem de Entulho da cidade de Osasco (URE). A fim de avaliar a possibilidade de obtenção de agregados graúdos reciclados de baixa porosidade, para possíveis aplicações em concreto, o trabalho experimental desenvolvido foi assim planejado: sucessivas etapas de homogeneização e amostragem, cominuição, separação densitária em jigues de estratificação laboratorial e caracterização dos produtos obtidos. Esta última foi realizada por meio da determinação da curva de separabilidade em separações sequenciais em líquidos com densidades crescentes, determinação da massa específica aparente, caracterização da distribuição granulométrica e da forma das partículas por análise de imagens dinâmica.

Os resultados mostraram que a jigagem gera um produto com cerca de 60% em massa e massa específica superior a $2,5 \text{ g/cm}^3$, o que caracteriza agregados de baixa porosidade. A caracterização da forma das partículas indica que não houve segregação em função da morfologia destas.

Assim, demonstrou-se que o jigues laboratorial alljig® estratificou os agregados reciclados em função da densidade das partículas, diretamente correlacionada à sua porosidade.

ABSTRACT

The construction industry stands out as a vital part of development of a country. This business moves the economy to deliver its products, and makes use of both inputs and generates waste, impacting directly and indirectly in various sectors. Aggregates are the raw materials with noticeable importance to the construction, given their essential use for the manufacture of cement and concrete. These materials are discarded as waste from construction and demolition. On one hand this cycle shows an upward trend extraction and depletion of suitable areas for disposal when the sector is booming, on the other hand it gives the opportunity to a recycling industry that would act on both ends of the production chain.

The construction and demolition waste (CDW) represent a large portion of all solid waste generated in the world. Much of this CDW, being of mineral origin, can be recycled through mineral processing, and then reused as building materials. To achieve high levels of recycling, it must be considered processes that lead to generate recycled aggregates with characteristics similar to those of natural, carried out with mineral processing operations with accurate control of the properties of the generated products.

The experimental program presented initially involved collecting samples of from construction and demolition waste of Usina de Reciclagem de Entulho in the city of Osasco (URE). In order to evaluate the possibility of obtaining recycled coarse aggregates of low porosity, for possible applications in concrete, the experimental work was planned as: successive steps of homogenization and sampling, comminution, density separation, laboratorial jig stratification and characterization of products obtained. The latter was accomplished by determining the distribution curve by heavy liquids separation, assessment of the envelop density, particle size distribution and characterization of the particles shape by dynamic image analysis.

The results showed that the jig generates a product with about 60% in weight and envelop densities above 2.5 g/cm^3 , which are characterized as low porosity aggregates. Characterization of particle shape indicates no segregation by morphology among stratified layers.

Thus, it was demonstrated that the laboratory alljig® the coarse recycled aggregates by particles density that is directly correlated to its porosity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	AGREGADOS RECICLADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	3
3.2	CONCENTRAÇÃO DENSITÁRIA POR JIGAGEM	3
3.3	JIGUE DE ESTRATIFICAÇÃO DE LABORATÓRIO	8
3.3.1	<i>Descrição do equipamento.....</i>	<i>8</i>
3.3.2	<i>Variáveis operacionais</i>	<i>9</i>
3.3.3	<i>Limitações do jigue de estratificação.....</i>	<i>9</i>
3.4	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS.....	11
3.4.1	<i>Morfologia das partículas</i>	<i>11</i>
3.4.2	<i>Massa específica real e aparente.....</i>	<i>12</i>
3.4.3	<i>Porosidade.....</i>	<i>14</i>
3.4.4	<i>Densidade envelope</i>	<i>16</i>
3.4.5	<i>Quantificação da pasta de cimento</i>	<i>18</i>
3.4.6	<i>Quantificação do teor de material cerâmico</i>	<i>18</i>
3.5	CURVAS DE SEPARABILIDADE POR DENSIDADE	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1	AMOSTRAGEM.....	22
4.2	JIGAGEM DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS	24
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS OBTIDOS	24
5	RESULTADOS	26
5.1	JIGAGEM DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS	26
5.2	DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO E FORMA DAS PARTÍCULAS	28
5.3	CURVAS DE SEPARABILIDADE POR LÍQUIDO DENSO	29
6	CONCLUSÕES.....	31
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

O macro setor da construção civil é uma peça chave na economia. Em 2009 representou 8,3% do PIB nacional e conforme projeção do relatório “Brasil 2022: planejar, construir, crescer”, para o Departamento da Indústria e Construção da FIESP, publicado pela ConstruBusiness 2010 (9º Congresso brasileiro de Construção) e desenvolvido por LCA Consultores e FGV projetos deve saltar para 9,5% em 2022. O mesmo estudo ainda prevê a criação de 3,3 milhões de novos postos de trabalho, elevando para 10,2 milhões em 2012 frente ao ano de 2009. Devido a tal importância na cadeia de produção, há forte influência do segmento na geração de renda e emprego.

Em 1995, dos mais de 75 mil trabalhadores registrados nas mineradoras e usinas de beneficiamento brasileiras, 40% pertenciam ao subsetor de materiais de construção (MACEDO, 1998), representando 2,7% do PIB em 2003 (DECONCIC, 2008). Em 2009, o valor bruto da produção de agregados minerais no Brasil foi da ordem de R\$ 22,6 bilhões em 2010, representando 0.615% do PIB (ANEPAC). A produção de agregados representada por aproximadamente 3.100 empresas, sustentam 70 mil postos de trabalho diretos e cerca de 250 mil indiretos (LUZ; ALMEIDA, 2012). Alguns índices, como o da Construção Civil (IBGE e CEF), que leva em consideração a quantidade de novas construções e o andamento da indústria de construção civil como um todo, é usado na determinação do índice de desenvolvimento de um país. Um destes índices, o índice de produtividade varia de 1.500 a 2.000 m³/homem/mês, ao passo que no Brasil a média gira em torno de 250 m³/homem/mês no caso da areia.

O termo “agregado” é utilizado para descrever a combinação de areia e rocha britada a ser utilizada na preparação de concreto, argamassas, bases de pavimentações, lastro ferroviário, entre outros. Os agregados são essenciais para as estruturas em concreto, influenciando em sua resistência, estabilidade e durabilidade. A norma brasileira NBR 9935 (ABNT, 2005a) define agregado para a construção civil como sendo um material com dimensões e propriedades adequadas para a produção de concreto e argamassa, geralmente inerte, e sem forma e volume definido. Possui vasta utilização na fabricação de concretos e argamassas, construção de base de estradas de rodagem, lastro de vias férreas, etc.

Este material pode ser agrupado dentre duas classes:

- I. Agregado miúdo, ou areia, que conforme a norma NBR supracitada, é aquele que tem 95% de sua massa passante na peneira com abertura de malha 4,75 mm; e
- II. Agregado graúdo, ou brita, que segundo a norma NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997), é aquele que é passante em 152 mm e retido em 4,8 mm.

O grande volume de produção (CACHIM, 2009), a dificuldade de se encontrar agregados nas regiões mais próximas aos centros urbanos, e a crescente rigidez das políticas para a deposição dos resíduos de construção e demolição faz com que a reaproveitamento destes ganhe um papel de destaque.

A reciclagem de RCD teve início na Europa no período posterior a segunda guerra mundial. O grau de atividade de reciclagem em diversos países depende da sua disponibilidade de recursos naturais, distância de transporte entre as partes fornecedoras de agregados, naturais ou reciclados, situação econômica e tecnológica do país e sua densidade populacional (HENDRIKS, 2000). Os agregados produzidos devem ser de baixa porosidade para que não haja efeito na relação água do traço/cimento do concreto. A absorção de água pelo agregado leva a uma mistura excessivamente seca e pouco trabalhável. Ao passo que a introdução de água para anular o efeito da porosidade, pode ser excessiva e assim levar a uma diminuição nas resistências mecânicas do concreto.

Dada a grande importância dos agregados para a indústria da construção civil, e a desta para a economia como um todo, o custo e qualidade deste são de fundamental relevância. Os custos que são impactados fortemente pelo transporte e deposição podem ser otimizados ao utilizarem-se agregados reciclados, porém para que haja utilização destes, devem-se ter métodos de baixo custo que forneçam um agregado com características semelhantes aos naturais.

Dessa forma, a tecnologia de processamento e o controle da qualidade do produto gerado são fundamentais para a produção de agregados reciclados com qualidade compatível à dos agregados naturais. Assim, tem-se a possibilidade de ampliação do mercado potencial dos agregados reciclados, contribuindo com a redução na extração de recursos naturais não renováveis, minimizando os efeitos sociais e ambientais da deposição ilegal de resíduos sólidos e contribuindo com a sustentabilidade do setor.

Sendo a porosidades um dos parâmetros limitadores dos agregados para a indústria da construção civil, a separação por densidade de produtos de RCD cominuído, via jigagem, pode levar a agregados semelhantes ao natural ou pode ser uma forma de obter um produto com características semelhantes ao agregado natural e com um baixo custo.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a separabilidade de agregados graúdos reciclados por densidade por meio de jigagem em jigue de estratificação laboratorial.

O escopo do trabalho envolveu a amostragem de resíduos de construção e demolição, separações em jigue de estratificação laboratorial em diferentes condições operacionais e a caracterização dos produtos gerados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AGREGADOS RECICLADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Em 2012, foram produzidos cerca de 346.772.000 t de areia e 267.987.000 t de brita, ambas destinadas à construção civil, ficando atrás apenas da produção de minério de ferro (DNPM, 2012). Aproximadamente 50% da produção mineral mundial, excluindo-se os minerais energéticos, tem como destino final a utilização na construção civil (JOHN, 2000), ainda, 85% dos minerais não metálicos produzidos no Brasil segue o mesmo destino (DNPM, 2012). Ao se levar em conta a produção informal, esses números tendem a ser ainda maiores. Um dos principais produtos da indústria civil, o concreto de cimento *Portland*, tem em sua composição 82% de agregados, sendo 42% gráúdo (brita) e 40% miúdo (areia) (MME, 2009). Tal porcentagem explicita a grande importância na escolha dos agregados.

O grande volume de produção (CACHIM, 2009), a dificuldade de se encontrar agregados nas regiões mais próximas aos centros urbanos, e a crescente rigidez das políticas para a deposição dos resíduos de construção e demolição faz com que a reaproveitamento destes ganhe um papel de destaque. As estimativas internacionais sobre a quantidade de resíduos produzidos pela construção que variam entre 130 e 3.000 kg/hab. ano (JOHN & AGOPYAN, 2000), tendem a crescer acompanhando o crescimento da indústria da construção civil, gerando mais dificuldades no gerenciamento desses resíduos. A proibição pelos órgãos governamentais (resolução 307 do CONAMA, de 2002) da deposição dos resíduos (classe A segundo a resolução CONAMA de 2002) em aterros sanitários faz com que os custos com a deposição aumentem significativamente. A reciclagem destes resíduos impactaria positivamente ao diminuir expressivamente os custos com aquisição, deposição e seus transportes, além de condizer com as práticas de uma economia verde e sustentável no longo prazo.

3.2 CONCENTRAÇÃO DENSITÁRIA POR JIGAGEM

A separação gravítica classifica as partículas de acordo com os seus pesos específicos, ou "densidades". Este método obedece à lei de Stokes ou de Newton, em função do regime de escoamento (GAUDIN, 1932), logo, a "velocidade terminal" de uma partícula dependerá unicamente da sua própria densidade, da densidade do fluido, diâmetro e forma das partículas. A jigagem e a separação em líquido denso são exemplos deste tipo de separação.

Na jigagem, a pulsação da água eleva as partículas do leito, e o material adquire uma velocidade de queda, que é proporcional à sua densidade. O material sofre estratificação durante o movimento descendente.

A separação deve-se à ação conjunta de três mecanismos independentes (Figura 1):

- a) a aceleração diferencial, dada pela Eq. 1, onde se pode extrair que apenas as densidades das partículas influem;
- b) a sedimentação retardada, que é a influência de uma partícula na sedimentação de outra, é mais presente nas frações grossas; e
- c) a consolidação intersticial: ocorre quando as partículas mais grossas possuem espaços entre si, permitindo a passagem das mais finas, é um mecanismo de extrema importância quando o objetivo é separar frações finas e grossas.

$$\frac{dv}{dt} = \left(1 - \frac{\rho}{\Delta}\right) * g$$

Eq. 1 – (Onde ρ é a densidade do fluido e Δ é a da partícula)

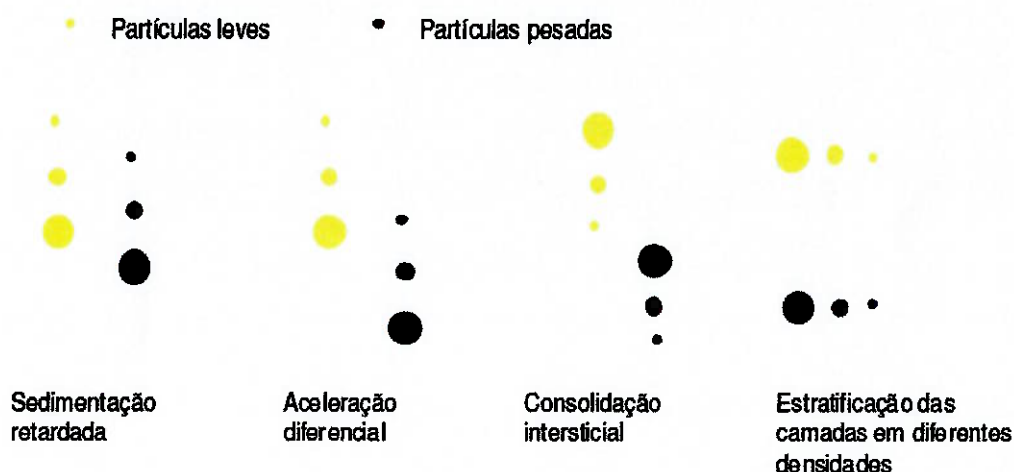


Figura 1 - Mecanismos de estratificação (GAUDIN, 1932; SAMPAIO; TAVARES, 2005)

Quando se lida com um grupo de partículas, não se tem a situação anterior, interpretada como sendo a ideal, pois as partículas graúdas sejam pesadas ou leves vão fechando o leito impedindo o movimento das mesmas durante a sedimentação. Por isso há mistura de partículas mistas tanto na fração leve quanto na fração pesada. Assim, pode-se afirmar que quanto menor a diferença granulométrica, mais eficiente é a separação densitária por jigagem (CHAVES, 2011).

Existem muitos componentes que influem na efetividade da separação (MUELLER; WIENKE, 2004), a saber: a) forma da onda ou diagrama de pulsação (simétrica ou assimétrica), Figura 2; b) amplitude ou intensidade do pulso (stroke), c) período ou duração do processo e d) a composição do material alimentado.

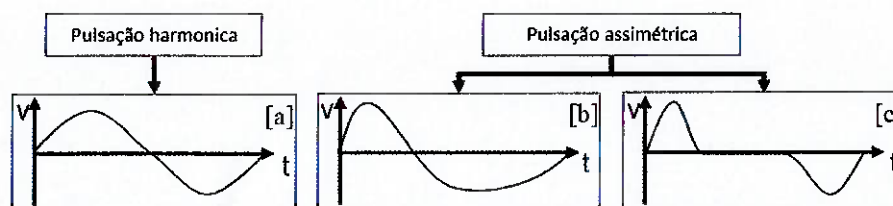


Figura 2 - Diferentes diagramas de pulsação

Segundo esses autores, a forma da onda é um dos fatores mais cruciais para uma separação mais eficiente de partículas com densidades próximas. Dados experimentais comprovaram que ondas assimétricas levariam a uma melhor separação, porém não se sabe ao certo como se dá a relação entre o movimento das partículas e a estratificação das mesmas. No caso onde a sedimentação de partículas é intensiva, o aumento na duração do processo influi melhora a separabilidade. Quanto mais intenso é o pulso, melhor é a estratificação.

A composição do material é geralmente um fator limitante, pois o processo pode não obter êxito ao separar grupos de materiais com densidades semelhantes. Por exemplo, o método separa bem o material leve e concreto ou rocha, e também gesso e concreto, porém não concreto de rocha.

A regulagem do jigge é feita ajustando os parâmetros supracitados entre outros, e um densímetro, que é ajustado para a densidade de corte, onde serão discriminados o underflow e o overflow, no caso de processos contínuos.

Baseado nas velocidades terminais de diferentes minerais em uma granulometria definida, Taggart estabeleceu um critério, Eq. 2, que quantifica a facilidade de concentração do processo, levando em consideração a densidade do mineral pesado (ρ_p) e a do mineral leve (ρ_l), considerando a densidade da água igual a um, quanto maior o número, mais fácil a concentração.

$$CC = \frac{(\rho_p - 1)}{(\rho_l - 1)}$$

Eq. 2- Critério de Concentração de Taggart

Tabela 1 – Eficiência de separação por densidade em função do Critério de Concentração

Critério de concentração	Eficiência da separação por densidade
> 2,5	Separação eficiente até 200 malhas
2,5 – 1,75	Separação eficiente até 100 malhas
1,75 – 1,50	Separação possível até 10 malhas, porém difícil
1,70 – 1,20	Separação possível até ¼", porém difícil

O material com alta porosidade acaba por absorver o fluido no qual esta imerso alterando assim a sua densidade aparente. Essa mudança de densidade pode leva-lo á densidades próximas a da fração mais pesada.

A jigagem realiza a contração e a dilatação vertical de um leito de partículas, separando-as em camadas de estratificação onde a densidade aumenta da camada superior a inferior (SAMPAIO e TAVARES, 2005). A melhor eficiência de separação é obtida para partículas com dimensão entre 2 e 8 mm. De acordo com Chaves (1992): “as partículas finas não têm massa suficiente para vencer a viscosidade da própria polpa e não participam desse processo, sendo eliminadas coletivamente com a fração leve”.

Os principais elementos que compõem um Jigue são: o tanque reservatório de água; a cuba (ou leito), onde será colocado o material a ser separado; e o dispositivo gerador da pulsação da água.

A Figura 3 apresenta alguns tipos de jigue. Variam basicamente na forma de geração de pulso (pistão, ar comprimido ou diafragma) e na tecnologia de controle de válvulas de admissão e retirada de água e ar.

Na Figura 3a está apresentada o jigue BAUM, que é acionado por ar comprimido. O jigue do tipo Harz tem acionamento por pistão (Figura 3b), enquanto que o jigue do tipo Bendelari tem por diafragma interno (Figura 3c). Os demais jigues são: PanAmericano (fundo do tanque móvel, Figura 3d), Richards (água pulsante, Figura 3e), Denver (válvula de água pulsante, Figura 3f), Yuba (diafragma lateral, Figura 3g) e MOBK (pistão pneumático, Figura 3h).

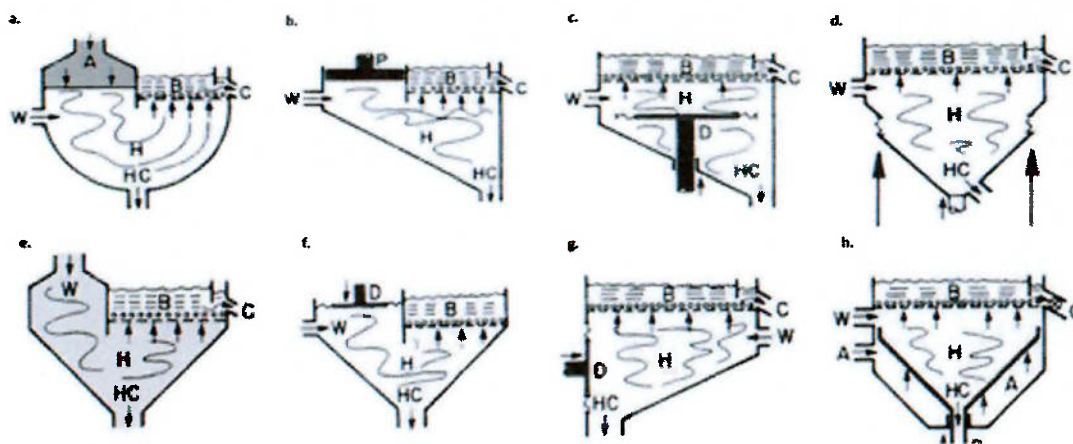


Figura 3 - Figura esquemática ilustrando os diferentes tipos de jigue

A jigagem é a mais antiga operação unitária de beneficiamento (CHAVES, 2011). Existem histórias afirmando que o jigue foi inventado por um artesão no Egito antigo (LYMAN, 1992), porém seu uso apenas é documentado no clássico “Agricola” (1556), evidenciando a vasta utilização do processo para concentração de carvão e minérios de metais bases na

Europa no século 16 (SAMPAIO e TAVARES, 2005). Atualmente estão sendo também aplicados na indústria de reciclagem (MUELLER; WIENKE, 2004).

O primeiro jigue mecânico foi desenvolvido em Harz, na Alemanha, até então a jigagem era manual. No jigue Harz, que possuía o acionamento por pistão, a sucção da água era muito abrupta, o que prejudicava a eficiência da separação, então foi modificado para que ao longo do período de sucção houvesse uma injeção de água por debaixo do leito (CHAVES, 2011).

A próxima inovação foi a troca do pistão pela câmara de ar comprimido e com um eficiente sistema de válvulas de controle de admissão e de descarga de ar e de água, que torna a água praticamente estagnada no ciclo de sucção. Assim tornou-se possível, através de regulagens destas válvulas, a alteração do formato da curva (diagrama de pulsação, Figura 2), tendo assim originado o jigue do tipo BAUM (Figura 4).

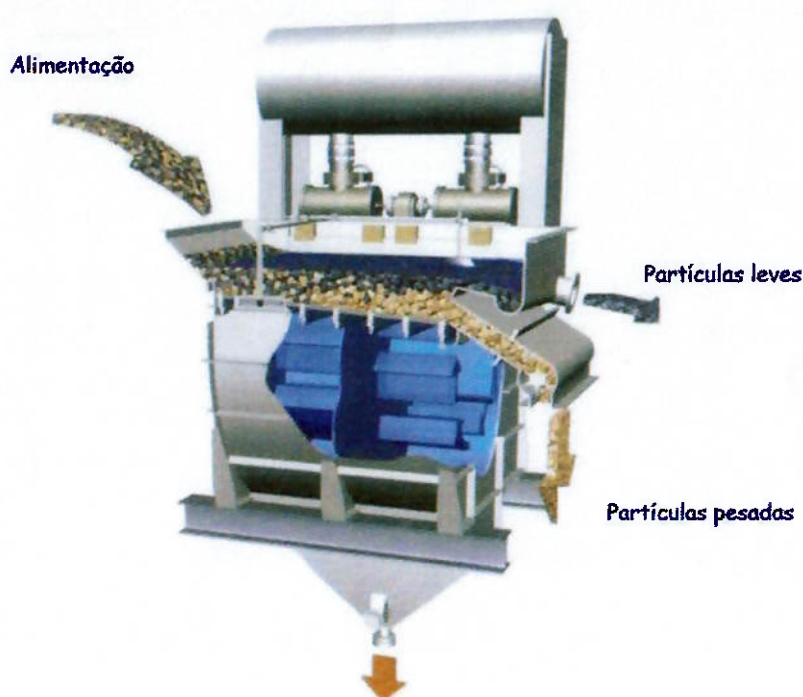


Figura 4 – Desenho esquemático sobre o funcionamento do Jigue BAUM
(Fonte: <http://www.allmineral.com>, modificado)

O jigue Batac é o que possui o projeto mais avançado atualmente. É totalmente automatizado e programável, possui uma precisão de separação comparável à separação em líquido denso, devido às válvulas independentes de entrada e saída de ar e água e uma série de outros detalhes.

Dentre as vantagens do jigue, podemos citar (BUNTENBACH et al., 1997; CHAVES, 2011; SAMPAIO e TAVARES, 2005):

- Separabilidade muito boa na faixa granulométrica de 9 a 2 mm,
- Capacidade elevada (até 800 t/h),
- Baixos custos de instalação e operacionais.

3.3 JIGUE DE ESTRATIFICAÇÃO DE LABORATÓRIO

3.3.1 Descrição do equipamento

O jigue laboratorial alljig® (Figura 5a), fabricado pela empresa alemã allmineral®, é um equipamento que opera em batelada e que tem capacidade recomendada de aproximadamente 20 kg por ensaio. É composto por:

- a) Leito: é composto pelo próprio material, que se dilata e contrai a cada pulso de água. Ele é depositado no recipiente de acrílico (Figura 5b);
- b) Recipiente acrílico: é onde o material a ser ensaiado é depositado. Localiza-se acima da cuba (reservatório de água), separado da mesma por uma placa de metal perfurada. Têm dimensões 400 x 400 x 800 mm³ e é formado por quadros de acrílico encaixáveis. Tais quadros possuem área fixa, 400x400 mm² (Figura 6a). Ao todo são 6 quadros de 25 mm e 5 de 50 mm. Eles devem ser dispostos de acordo com a granulometria do material a ser ensaiado. O fabricante recomenda posicionar os quadros de 25 mm por baixo quando a granulometria do material a ser ensaiado for inferior a 15 mm (Figura 6a e Figura 6b);
- c) Cuba: localizado na parte inferior do equipamento, é o reservatório de água do equipamento, que será injetada e removida do recipiente onde o material se encontra, passando pela placa de metal perfurada, quando o equipamento for acionado;
- d) Reservatório de ar: localizado na parte superior do jigue, é um recipiente de metal rígido, com duas saídas (para o ambiente e para a cuba) e uma entrada (proveniente do soprador);
- e) Válvula de admissão (RotaryValves): Permite a passagem do ar do reservatório para o sistema. É acionada por uma botoeira, no painel de controle;
- f) Válvula estranguladora: válvula manual, localizada entre na parte posterior superior do equipamento entre o reservatório de ar e a cuba, que controla o fluxo de ar insuflado à cuba;
- g) Soprador (blower): localizado na parte traseira logo abaixo do reservatório de ar, quando acionado (por uma botoeira, no painel de controle), insufla ar atmosférico para dentro do reservatório;
- h) Válvula de pressão (ou escape): é uma válvula vermelha, de regulação manual, situada logo abaixo do reservatório de ar, é a conexão do mesmo com o mesmo externo. Esta controla a pressão, mostrada em um medidor de localizado na coluna direita do equipamento (Figura 6c), com a qual o ar é soprado para a cuba. Tal pressão controla a amplitude do pulso, sendo proporcional a mesma;

- i) Motor: situado na parte inferior traseira, é controlado por um potenciômetro, no painel de controle, que controla a frequência do pulso e é medido em RPM, sendo diretamente proporcional a mesma;
- j) Painel de controle: situado na parte lateral esquerda, é onde estão localizados as botoeiras (blower e RotaryValves), o potenciômetro e a botoeira de travamento (parada emergencial), é exibido na Figura 6d.

3.3.2 Variáveis operacionais

São poucas as variáveis operacionais do jig, no qual controla-se basicamente a amplitude e a frequência de oscilação do pulso.

- Amplitude do pulso: controlada pela válvula de pressão, exibida no medidor de pressão, variando entre 0 e 1 bar (0 e 14 psi). O fabricante recomenda usar pressões entre 0.09 a 0.15 bar para material acima de 15 mm e entre 0.05 a 0.12 bar para granulações inferiores
- Frequência do pulso: controlada pelo potenciômetro do painel de controle e exibida em um visor no mesmo painel. É recomendado pelo fabricante o uso de 60 a 70 rpm para material acima de 15 mm e entre 80 e 90 rpm para granulações inferiores.

A variação da frequência do pulso implica também em alteração da amplitude deste, sendo que quanto maior a frequência, menor a amplitude e vice-versa. Dessa forma, o ajuste de amplitude e pressão é um processo iterativo do ajuste da pressão e frequência do pulso.

3.3.3 Limitações do jig de estratificação

O jig de batelada é um jig laboratorial, e se diferencia do equipamento convencional por:

- Não possuir um crivo (leito) de material com densidade controlada, geralmente esferas de aço, que se contrai e expande com objetivo de realizar a separação do material alimentado;
- A alimentação não ser contínua, sendo necessária a parada, remoção, limpeza e alimentação para efetuar outra separação (ensaio).

O perfil de pulsão pode ser observado mais claramente em testes realizados sem material. Deste modo, é possível verificar o movimento ondulatório que a água faz quando o equipamento é acionado. A alteração dos parâmetros (variáveis) operacionais altera a forma do pulso.



(a) Vista frontal do alljig®



(b) Alimentação de material e água

Figura 5 – Jigue de estratificação laboratorial alljig®



(a) quadro de acrílico para distinção das camadas



(b) coleta dos produtos nas camadas estratificadas



(c) medidor de pressão



(d) painel de controle

Figura 6 - Jigue de estratificação AllJig

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS

3.4.1 Morfologia das partículas

As características morfológicas das partículas (distribuição granulométrica e de forma) são informações muito importantes na indústria mineral, química, civil, farmacêutica entre outras áreas.

A morfologia das partículas é uma propriedade que exerce grande influencia no comportamento de argamassas e de concreto, tanto no estado fluido quanto no endurecido (GONÇALVES,2000). Os agregados miúdos de origem sedimentar possuem grãos mais angulosos (RAVINDRARAJAH e TAM, 1985) e morfologia irregular para boas misturas (HANSEN e NARUD, 1983) o que dificulta a substituição por agregados reciclados (ULSEN, 2011).

Técnicas de análises granulométricas são bem consolidadas e vastamente empregadas, dentre elas cabe citar o espalhamento de luz laser de baixo ângulo como sendo uma das mais utilizadas. Porém, a maioria das técnicas usuais não fornece parâmetros relativos à forma das partículas, as que o fazem, são limitadas quanto à estatística de partículas, apresentando baixa representatividade, ou à orientação preferencial das mesmas (HAWLITSCHKEK *et al.*, 2013).

Técnicas que fazem uso de análises de imagens de partículas em fluxo contínuo são já há algum tempo utilizadas na indústria alimentícia, porém limitadas à análise de partículas milimétricas. Tais técnicas fornecem parâmetros relativos à forma apresentando boa representatividade. A partir do avanço dos sistemas de aquisição de imagens e de processamento para análise de expressiva quantidade de dados, permitindo às técnicas caracterizar partículas submicrométricas, estas começaram a apresentar um grande potencial para a indústria civil, no controle de qualidade de matérias primas (areia e brita) e de argamassas formuladas (areia e cimento), e na indústria mineral, na avaliação da forma para diversas tais como a caracterização de partículas geradas por diferentes processos.

A caracterização da morfologia das partículas pode ser realizada por três diferentes métodos:

- a) Aquisição de imagens em modo estático com análise visual qualitativa,
- b) Aquisição de imagens estática associada a sistemas de análise de imagens dinâmica,
- c) Aquisição de imagens dinâmica com sistemas de análise de imagens automatizada.

Tradicionalmente empregada na industrial mineral, a aquisição de imagens em modo estático com análise visual qualitativa é feita por instrumentos que fornecem as feições ou parâmetros de medidas em imagens bidimensionais que se relacionam com as estruturas tridimensionais (estereologia) (RUSS, 1986).

Portanto, através de análise de imagens são obtidas informações quantitativas (JONES, 1987; MAINWARING e PETRUK, 1989) caracterizando numericamente aspectos geométricos de feições da microestrutura, tais como tamanho, forma e orientação (UNDERWOOD, 1970). Normalizadas pela ISO 13322-1/04 (ISO, 2004), a microscopia óptica (MO) ou eletrônica de varredura (MEV) se mostram atividades exaustivas e morosas.

Programas de computador construídos para captar e processar imagens, desenvolvidos a partir dos anos 1970 e chamados de analisadores de imagens, automatizaram o processo de obtenção das medidas das feições de interesse (ULSEN, 2011).

A norma internacional ISO 13322-2/06 (ISO, 2006) descreve métodos de análise por fluxo dinâmico, que apesar de recentes vêm trazendo muitos benefícios na caracterização dos parâmetros geométricos de partículas. Ao analisarem uma grande quantidade de partículas, dezenas de milhares, em uma grande faixa granulométrica, entre 20 micrometros e 30 milímetros, dispensando qualquer tipo de classificação, em meio seco ou suspensão, fornecem parâmetros de forma e distribuição de tamanho. O método elimina o viés de orientação preferencial (aleatoriedade das partículas no fluxo), possui grande reprodutibilidade (MILLER e HANDERSON, 2010) e realiza análises com elevada estatística de partículas (KOHLE e LIST, 2005) além de ter uma grande rapidez, devido às coletas de imagens em nano segundos.

3.4.2 Massa específica real e aparente

A precisa compreensão do significado físico de massa específica aparente e real permite o entendimento das propriedades dos agregados reciclados e estão diretamente relacionadas à porosidade das partículas.

Massa específica real é a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluídos todos os vazios, ou seja, volume dos sólidos excluído volume dos poros (Figura 7).

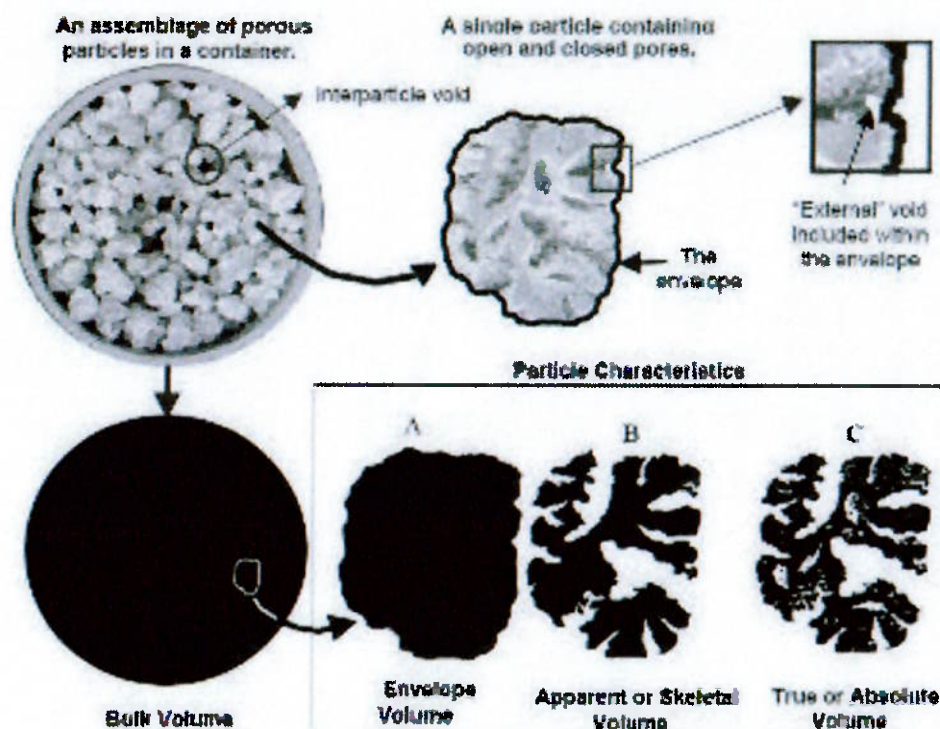


Figura 7 - Diferentes tipos de volume considerados na determinação das massas específicas ou densidades

Pode-se determinar a massa específica real (MER), sem os poros permeáveis, através de métodos clássicos (picnometria de água e balança hidrostática) e também através da picnometria de gás Hélio. Esse método é utilizado pela facilidade de se difundir dentro dos menores poros. O princípio do método é medir a mudança de pressão que ocorre na presença das partículas do sólido.

A célula, com volume conhecido (V_c), contendo um sólido, com volume desconhecido (V_s), é pressurizada até cerca de 17 psi (P_1). Depois, ela é aberta e determina-se a pressão (P_2). Assumindo-se a temperatura constante e a inexistência de perdas de gás e aplicando-se a Lei de Boyle ($PV=nRT$), tem-se:

$$P_1 \times (V_c - V_s) = P_2 \times (V_c - V_s + V_r) \quad (\text{Eq. 5})$$

Isolando V_s , tem-se:

$$V_s = V_c - \left[\left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \times V_r \right] \quad (\text{Eq. 6})$$

em que: V_s é o volume de sólidos (em cm^3); V_c é o volume da célula (em cm^3); P_1 é o valor da pressão (em psi) determinado após fechamento da célula (~ 17 psi); P_2 é o valor da pressão (em psi) estabilizado após a abertura da célula; V_r é o volume residual (em cm^3) que não pertence à célula.

A medida de massa específica aparente (MEA) é uma relação entre a massa das partículas do sólido e o volume envelope ou de contorno das partículas, que corresponde ao volume de poros internos (permeáveis ou não permeáveis), conforme ilustrado na Figura 8.

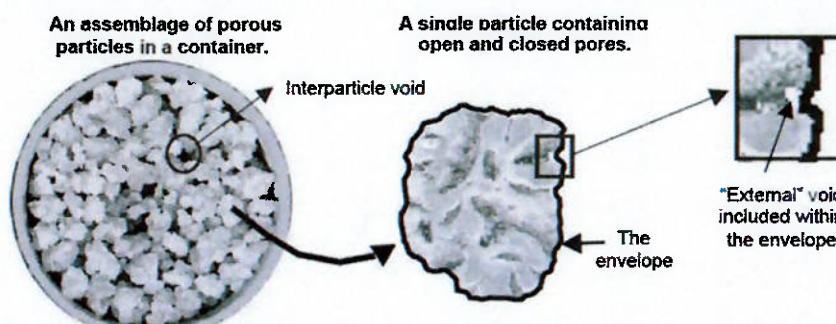


Figura 8 - Definição do volume envelope das partículas porosas (WEBB, 2001)

3.4.3 Porosidade

A porosidade observada nos agregados reciclados é devido principalmente à pasta de cimento aderida à superfície das partículas (CHEN, YEN *et al.*, 2003) e ao teor de material cerâmico. A porosidade pode ser medida indiretamente através da determinação da absorção de água.

A absorção de água, tal como a porosidade, é um parâmetro que influencia diretamente nas características de trabalhabilidade (POON, SHUI, LAM *et al.*, 2004), nas propriedades mecânicas (GOMEZ-SOBERON, 2002), sendo inversamente proporcional a resistência mecânica do sólido (VAN VLACK, 1970; CALLISTER, 2000) e de durabilidade (LEVY e HELENE, 2004) do concreto. Esta é a propriedade física que mais deferência os agregados segundo sua origem, reciclada ou natural, (HANSEN, 1986; KOBAYASHI e KAWANO, 1988; LAMOND, CAMPBELL *et al.*, 2002).

3.4.3.1 Ensaio clássico de agregados graúdos (NBR NM 53)

O procedimento da norma NBR NM 53 é executado para determinar a massa específica real, massa específica aparente e a absorção de água dos agregados graúdos na condição saturado de superfície seca. A massa mínima da alíquota para o ensaio é definida na tabela 2 da norma ABNT NBR MN 53, de julho de 2003.

O material deve ser submerso em água por 24 h (Figura 9a), envolvido em panos absorventes (Figura 9b) até que toda a água superficial das partículas seja removida, o lote é então pesado, colocado em um cesto, submerso em água e então pesado novamente por uma balança hidrostática (Figura 9c). A massa deve ser seca em estufa ajustada para 105°C, deixar esfriar até uma temperatura que permita a manipulação e então pesado novamente.



(a) material graúdo submerso em água



(b) secagem dos agregados com pano



(c) medida da massa submersa em
balança hidrostática

Figura 9 - Procedimento de determinação de absorção de água e massa específica aparente segundo procedimento da norma NBR NM 53

3.4.3.2 Absorção de água do agregado miúdo (NBR MN 30)

O Ensaio NBR MN 30 é um método que determina a absorção de água, e a massa específica aparente, pelo agregado miúdo, na condição saturada superfície seca, que é quando a partícula absorveu o máximo de água, porém mantém sua superfície seca. Nele o líquido é levado a ocupar os poros permeáveis do material.

Uma alíquota de 1 kg, obtida por amostragem, para garantir a representatividade da mesma, é secada em estufa a temperatura de aproximadamente 105° C. O material é dito seco quando a massa varia menos 0,1 g em duas determinações consecutivas.

O material é submerso em água por 24 h e então estendido sobre uma superfície plana e submetido a uma corrente fraca de ar quente (Figura 10a), revolvendo-o constantemente para garantir uma secagem uniforme. Periodicamente, deve ser colocado em um tronco de cone metálico, amassado suavemente por 25 golpes consecutivos com a haste de compactação e então o molde deve ser retirado verticalmente. Se o material conservar a forma do molde, ainda há umidade, se desmoronar, estará então, na condição almejada. É assim

pesado e levado a estufa ajustada 105 °C para que haja total evaporação da água e então esfriado a temperatura ambiente em dessecador e pesado novamente.

3.4.3.3 Massa específica do agregado miúdo (NBR NM 52)

O objetivo da norma NBR NM 52 é determinar a massa específica real e massa específica aparente dos agregados miúdos, utilizando-se os agregados na condição seca e saturada com superfície seca (SSS). Seguindo o mesmo procedimento do NM 30 para alcançar a condição desejada e então depositar uma porção de 500g de amostra em um frasco de 500 cm³ (Figura 10b), completado com água e agitado periodicamente para eliminar as bolhas, mantendo-o sempre em uma bacia com água para que não haja perturbação na temperatura, que deve estar em torno de 21°C. Após 1 h deve ser completado com água até a marca de 500 cm³ e ter sua massa total determinada. É então levado a estufa e os procedimentos de secagem e pesagem seguem os moldes da norma NBR NM 30.



(a) secagem do agregado miúdo com corrente de ar quente



(b) Picnômetro em banho com água aquecida para manter a temperatura constante

Figura 10 - Fotografias ilustrando procedimentos para determinação da absorção de água e massa específica aparente de agregados miúdos

3.4.4 Densidade envelope

A massa aparente pode ser determinada determinando-se a densidade envelope em equipamento Geopyc 1360, da Macromeritics, que determina o volume envelope pela medida de deslocamento volumétrico do meio que envolve a(s) partícula(s) (WEBB; ORR, 1997).

Neste caso, o meio é um *quase fluido* conhecido como DryFlo, que contém uma distribuição de esferas rígidas e muito pequenas, permitindo o preenchimento no entorno da superfície das partículas, sem invadir os poros, e amplo escoamento entre elas.

O ensaio é realizado em um cilindro oco com laterais de vidro, uma de suas extremidades é fechada por uma peça fixa de aço, que permite apenas a passagem de ar, e a outra é aberta para a inserção do material e subsequente atuação do pistão.

O material a ser ensaiado é colocado no recipiente e o pistão inserido, enclausurando totalmente o material. O conjunto cilindro-pistão é então encaixado no aparelho através de uma rosca em cada peça.

O ensaio se inicia com o recolhimento do pistão até a posição definida pelo aparelho gerando um volume vazio no recipiente. Tal posição será a origem do eixo longitudinal, o qual o pistão percorre. O conjunto é então rotacionado com pequenas paradas, fazendo com que o material escoe e assim tenha uma melhor acomodação. Paralelamente, o pistão caminha lentamente, diminuindo o volume e se aproximando do material.

A tensão de compressão é medida e mostrada instantaneamente, e conforme o pistão inicia a compactação do material, tal tensão aumenta. O ensaio segue até que uma tensão previamente definida seja alcançada, gerando um volume mínimo do material ensaio, e então o pistão é recolhido. Tal mecanismo objetiva a não destruição do material ensaiado tampouco do equipamento utilizado.

O procedimento é repetido um numero de vezes previamente determinado pelo operador, geralmente em torno de 3 vezes. São feitos dois grupos de medições por ensaio, um apenas com um volume de *DryFlo* e a amostra a ser ensaiada e outro apenas com o mesmo volume previamente utilizado. Há uma parada para a remoção do conjunto cilindro-pistão, retirada de todo material ensaiado, peneiramento do mesmo, de forma a separar o *DryFlo* da amostra e recolocação da substancia para ser ensaiada sozinha. Após o segundo grupo de medições são mostrados no visor do aparelho os valores obtidos no ensaio.

A compactação controlada com a vibração da célula de precisão permite a obtenção de medidas reprodutíveis.

A Figura 11 ilustra o funcionamento do equipamento. A partir de uma massa conhecida de *DryFlo*, o processo de compactação controlado define o volume inicial. As massas das partículas porosas determinadas e, então, elas são adicionadas no cilindro, determinando-se a diferença na distância do pistão (h) que penetra no cilindro. Essa distância permite o cálculo do volume envelope ($V_a = \pi r^2 h$). Por fim, a massa especifica aparente (MEA) é calculada pela relação entre a massa seca e o volume aparente das partículas.

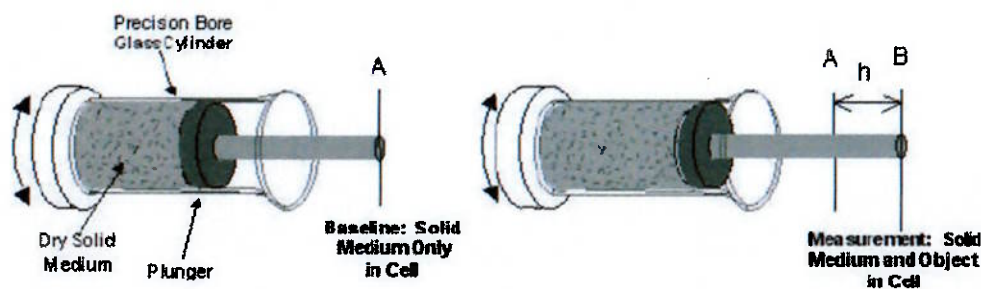


Figura 11 - Ilustração do princípio de funcionamento do equipamento (WEBB, 2001)

3.4.5 Quantificação da pasta de cimento

A pasta de cimento que permanece no agregado reciclado, proveniente de outras construções, é a causadora dos principais problemas no uso destes (BARRA e VAZQUEZ, 1998; DE JUAN e GUTIERREZ, 2009). Essa pasta proporciona ao concreto uma alta porosidade e absorção de água, elevado índice de abrasão Los Angeles e maiores teores de sulfato. Não obstante, pode-se citar alterações nas características mecânicas como elasticidade, durabilidade e resistência à compressão.

O procedimento para quantificação da pasta de cimento em agregados reciclados que é descrito em literaturas correlatas é a reação do agregado reciclado com uma solução ácida (NISHBAYASHI e YAMURA, 1988; YAGISHITA, F, SANO, M et al., 1994; QUARCIONI e CINCOTTO, 2006). O ataque por ácido clorídrico acaba por reagir com a pasta de cimento e o com os carbonatos. Rochas, cerâmicas, argilominerais e micas constituem o resíduo insolúvel por não reagirem com a solução ácida (GRIM, 1953; STEEN e BORG, 2002). Porém não existe uma normatização para a determinação de tal teor.

Angulo e colaboradores, ao aplicarem, em agregados reciclados de diferentes origens, o ataque ácido com concentração de 33% de HCl (QUARCIONI e CINCOTTO, 2006) para a determinação do teor de pasta de cimento, e como resultado demonstraram que o teor de pasta de cimento pode ser estimado pela soma dos teores de CaO com a perda ao fogo a 1.050°C (ANGULO, 2005; ANGULO, ULSEN et al., 2009).

O ataque ácido e a estimativa pela soma são métodos que possuem restrições ao tratar-se de agregados com presença de calcário, pois são solubilizados pelo ácido e acabam por aumentar ambos os teores da soma, CaO e PF, superestimando assim o teor presente de pasta de cimento.

3.4.6 Quantificação do teor de material cerâmico

O teor de material cerâmico está correlacionado com a absorção de água dos concretos (ANGULO, 2005). Tal matéria representa uma das fases mais porosas, portanto possui menores densidades quando comparada à fase rochosa. Essa propriedade, similarmente da observada na pasta de cimento, influencia diretamente nas propriedades do concreto.

A quantificação do teor de material cerâmico em agregados reciclados é tradicionalmente realizada por seleção manual dos fragmentos, operação unitária denominada "catação". Dessa forma, o método fica limitado a partículas mais grossas; para areias com granulação fina, o procedimento exigiria a utilização de microscópio estereoscópico e pinças para seleção das fases, exigindo grande atenção e tempo para análise de um número reduzido e pouco representativo de partículas.

A técnica de catação consiste em separar manualmente diferentes fases, diferenciadas por cor, forma ou textura das partículas (CHAVES, 1996; HENDRIKS, 2000). ANGULO (2000) afirma que o método nem sempre é eficiente, apresentando uma variação de 0 a 3,5% nos teores da fração não mineral dos agregados graúdos de RCD reciclado em um estudo realizado em uma usina piloto.

Haja vista que apesar de métodos como a microscopia óptica (JONES, 1987; SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997) e semi-automatizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) serem eficazes na caracterização de associações e quantificação de fases, apresentam baixa representatividade estatística (FANDRICH, GU et al., 2007) e são dispendiosos e morosos. Uma alternativa considerada para quantificação das fases em agregados miúdos reciclados foi a integração de sistemas de análise de imagens na automação de microscópios eletrônicos de varredura acoplados a espectrômetros de raios X por energia dispersiva – EDS (análise por feixe de elétrons) (ULSEN, 2011)

Cabe ressaltar que não há citações na literatura de métodos automatizados para determinação do conteúdo de material cerâmico em agregados reciclados.

3.5 CURVAS DE SEPARABILIDADE POR DENSIDADE

As partículas se agrupam de acordo com suas propriedades físicas e são essas que possibilitam a separação desses grupos.

Para britagem, moagem, peneiramento e classificação, a distribuição dos tamanhos das partículas é de fundamental importância. Tal parâmetro, independentemente da composição mineralógica, é altamente particulares, variando para cada material, até mesmo naqueles da mesma jazida. No caso das separações densitárias, outra propriedade importante é a densidade, distribuindo as partículas de acordo com a densidade de cada uma.

A população de partículas possui uma distribuição de frequência de suas propriedades que pode ser traduzida por uma curva de frequência, que também é a sua curva de separabilidade (KELLY, 1982) quando se a propriedade é a densidade. Tais curvas permitem a previsão do comportamento do material na separação (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997) e indicam a separação ideal do material ou a mais próxima desta baseada nas propriedades físicas do mesmo. É usada como meta e comparada com a curva real do processo denotando o rendimento deste.

As curvas de separabilidade podem ser expressas por histogramas, curva de frequência ou frequência acumulada, ou ainda de forma numérica por funções matemáticas (CHAVES, 1992).

Em 1937, Tromp estabeleceu um conceito de curva, chamada de curva de partição na Europa e curva de distribuição nos Estados Unidos, que representa a porcentagem de massa dentro de cada fração densitária, que vai para o afundado (Figura 12) (BURT, 1984; CHAVES, 1992). A partição, em porcentagem, para cada faixa de separação é dada pelo quociente da massa alimentada pela massa afundada, a cada separação (CHAVES; 2013).

A curva pode ser plotada com os valores de densidade no eixo das abscissas e os de partição no eixo das ordenadas. Os valores de partição são também a esperança matemática da partícula estar na porção afundada, no caso de curvas de acumulado no afundado.

Chaves (1992) define que densidade mediana de partição é o valor de corte do processo representado pela classe d_{50} , que traduz a densidade na qual 50% do material afunda. Segundo este mesmo autor, a medida da dispersão tradicionalmente usada é a metade da distância inter-quartis central $(d_{75}-d_{25})/2$ (Eq. 3).

$$E = 0,5 \times (d_{75} - d_{25}) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: d_{50} ou d_p – é a densidade de partição;

d_{25} – é a densidade na qual afunda 25% da alimentação;

d_{75} – é a densidade na qual afunda 75% da alimentação.

Para a curva do processo real, que será comparada à do ideal, de separabilidade, é somado aos valores das densidades um valor corrigido. Tal parâmetro depende da densidade de corte e do equipamento/processo, se for separação em aparelhos de meio denso (

Eq. 4) ou outros aparelhos ($E = I \times (d_p - 1)$ Eq. 5) (CHAVES; 2013).

$$E = I \times d_p \quad \text{Eq. 4}$$

$$E = I \times (d_p - 1) \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: I – parâmetro representativo do equipamento ("Fator Terra de Imperfeição").

O valor de " I " (Eq. 4) não é constante e depende do tipo de aparelho, segundo constatações de trabalhos técnicos do Bureau of Mines. Este parâmetro pode então ser expresso como uma função para cada equipamento e fração granulométrica, de acordo com o modelo de Gottfried.

A curva real é então traçada com os valores de partição e os valores das densidades (corrigidos) de forma similar à curva de partição ideal.

O gráfico (curva) de partição é então definida como a junção das curvas de separabilidade ideal e a real de um dado equipamento (Figura 12).

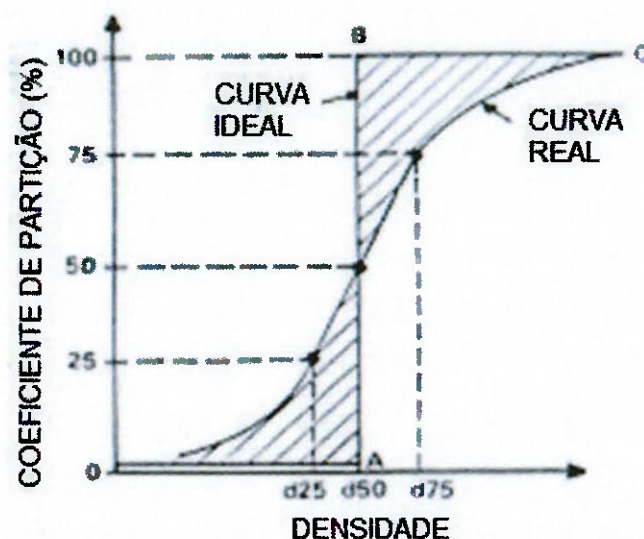


Figura 12 - Curva de partição (LUZ et al., 1998; CHAVES, 1992)

A curva OABC (Figura 12) representa a situação ideal, na qual todas as partículas de densidade superior à de corte iriam para o overflow (flutuado) e as de densidade inferior iriam para o underflow (afundado), porém, há a possibilidade de isso não ocorrer e a partícula ir para o fluxo errado, essa probabilidade está indicada pela região hachurada (CHAVES, 1992).

Assim, a curva de partição pode ser prevista experimentalmente, para um mesmo equipamento e fração granulométrica, através de: a) recuperação da massa do produto afundado, b) conhecimento da imperfeição da separação, e c) as curvas de separabilidade ideal.

A determinação da curva de separabilidade para materiais porosos esbarra em uma dificuldade adicional tendo em vista que estes podem absorver o líquido, indicando uma massa específica aparente maior do que seu valor de fato.

Dessa forma, a curva de separabilidade nos produtos de menor densidade (fases com maior porosidade) são as que mais absorvem o líquido denso, gerando uma diferença de densidade aparente de 0,1 a 0,3 g/cm³. Para produtos com densidade acima de 2,4 g/cm³, a absorção do líquido é praticamente nula, de forma que as massas específicas aparente e real se aproximam e a absorção do líquido tende a ser nula.

Assim, métodos alternativos são valiosos na caracterização da separabilidade de materiais porosos. Duas alternativas são possíveis: separação por densidade por meio de uma polpa com material particulado (separação em meio denso) e a caracterização no equipamento Geopyc. Em ambos os casos, os meios de caracterização são partículas que não penetram nos poros superficiais das partículas, minimizando os efeitos indesejáveis de absorção.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 AMOSTRAGEM

Amostras foram coletadas na usina de reciclagem de RCD URE do município de Osasco no estado de São Paulo, totalizando duas toneladas. A usina não dispõe de controle da produção, não sendo assim possível estabelecer o balanço de massa dos produtos. A usina não dispunha de controle de produção, inviabilizando assim o balanço de massa. O processamento da usina, via seca, faz uso das seguintes operações unitárias: catação de materiais indesejáveis (aço, madeira, etc.), cominuição (por moinho de martelos (Figura 13 e Figura 14), peneiramento e operações auxiliares (transporte por escavadeira e transportadores de correia e abatedores de poeira).

A usina recebe o material em um pátio de entrada, onde ocorre a sua classificação. Pode ser classificado como cinza ou vermelho, dependendo da porcentagem de cerâmica presente ou ainda rejeitado pela usina de acordo com a quantidade de materiais contaminantes, como partes de estruturas metálicas ou outros materiais comumente encontrados em resíduos da construção e demolição (ANGULO, 2000).



Figura 13 - Usina em funcionamento



Figura 14 - Moinho de martelos

Após a classificação do lote recebido, o material passa por uma etapa de catação de materiais indesejáveis e então é estocado em pilhas de acordo com o tipo de material, vermelho ou cinza. O tipo de material a ser processado depende do tipo de demanda, é recolhido da pilha desejada e então alimentado no britador de martelos, transportado por um transportador de correia (Figura 13) até uma peneira com diferentes malhas que separa o fluxo, gerando os produtos da usina.

A cada dia de coleta foram recolhidas, em horários aleatórios, na saída do transportador de correia, e antes do peneiramento, 2 latas de 30 L de cada tipo de material (vermelho e cinza), excuso os dias afetados pela chuva e os dias de paradas de manutenção do britador. A massa da amostra coletada foi superior a 2 toneladas.

O material coletado foi transportado ao Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP, onde foi britado em circuito fechado, utilizando-se britadores de mandíbulas, com aberturas de 20 e 9 mm, respectivamente, até que aproximadamente 98% do material fosse passante na malha de 9,52mm (3/8"). Esta dimensão foi escolhida por aumentar a separação da rocha do cimento (liberação da rocha) (ULSEN, 2006). A britagem transforma parte da pasta de cimento endurecida e frágil em material fino, abaixo de 0,074 mm.

Para garantir a homogeneização, o material foi distribuído sobre uma lona, de maneira uniforme e ininterrupta em camadas de sentidos contrários, formando uma pilha alongada de seção triangular (GOES *et al.*, 1998). Foi feito ainda o procedimento de retomada de extremidades, no qual a pilha é cortada (na parte onde começa a inclinação) e o material dos extremos é redistribuído ao longo da pilha de acordo com o mesmo procedimento de formação de pilha (Figura 15).

Foram feitas 3 pilhas de homogeneização, uma formada apenas pelo material cinza, que possuía uma massa aproximada de 1250 kg, outra apenas pelo material vermelho, com aproximadamente 1000 kg e uma última misturando os dois, formando assim um material misto com uma massa total próxima a 2,25 t. A pilha de material misto foi feita de forma diferente, após a deposição de uma camada de um tipo de material, vermelho ou cinza, era depositada logo acima uma camada do outro material, para evitar a segregação dos materiais presentes.

Para cada pilha, foi realizada a amostragem, em 5 ou 6 seções, com aproximadamente 50 kg cada, representando um total de 25% de massa da pilha (250 kg para o material vermelho e 300 kg para o material cinza), para os estudos laboratoriais subsequentes.



Pilha de homogeneização alongada com retirada das extremidades



Retirada de alíquota da pilha de homogeneização

Figura 15 - Execução do procedimento de formação de pilha alongada para homogeneização e retomada das extremidades

4.2 JIGAGEM DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS

Os ensaios foram realizados em diferentes condições operacionais, com o intuito de definir as melhores configurações para maior eficiência na separação entre as fases de maior e menor porosidade, especialmente para obtenção de um produto pesado rico em partículas com reduzido conteúdo de pasta de cimento (densidade acima de $2,5 \text{ g/cm}^3$), um produto misto e um produto leve com densidade abaixo de $2,2 \text{ g/cm}^3$ enriquecido em fases porosas e pasta de cimento. O produto pesado obtido deverá ser composto essencialmente por rochas com um teor reduzido de pasta de cimento aderida, que se assemelha ao agregado natural para uso em concreto.

Foram ensaiadas amostras com granulometria inferior à 9,5 mm, portanto com material fino, e com material entre 2,0 e 9,5 mm. Diferentes parâmetros para rotação foram utilizados, gerando diferentes frequências e amplitudes. O sumário dos ensaios realizados, com as condições operacionais, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaios de jigagem com diferentes regulagens para dois grupos de amostras

Ensaio	Amostra	Frequência (RPM)	Pressão (bar)	T (min)
1	<9,5mm	50	0,12	20
2	<9,5mm	90	0,12	20
3	<9,5mm	50	0,00	20
4	<9,5mm	90	0,00	20
5	-9,5+2,0	90	0,12	20
6	-9,5+2,0	60	0,12	20
7	-9,5+2,0	90	0,00	20
8	-9,5+2,0	60	0,00	20

De acordo com as especificações do fabricante, o material a ser ensaiado deveria estar acima de 2,00 mm. Porém, com o intuito de adequar o processo as condições que seriam mais facilmente adotadas pela indústria, por serem mais praticas e econômicas. Assim foram testadas condições com e sem a fração abaixo de 2,0 mm.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS OBTIDOS

Os produtos obtidos na jigagem foram caracterizados quanto aos seguintes parâmetros: a) distribuição de tamanho e forma de partículas, b) curva de separabilidade por separação em líquido denso, c) caracterização da massa específica aparente determinada em equipamento Geopyc.

A caracterização da distribuição de tamanho e forma das partículas foi realizada em alíquotas representativas de produto da separação por análise de imagens por fluxo de

partículas no equipamento da marca Retsch, modelo Camsizer L (30 μ m a 30 mm), segundo procedimento descrito pela norma ISO 13322-2/ 2006.

As curvas de separabilidade foram determinadas por separações sequenciais em líquido com densidades crescentes. O procedimento consiste em utilizar um líquido com densidade intermediária entre os componentes que se deseja separar, neste ensaio foi utilizada uma mistura de bromofórmio (tribromometano) e álcool etílico (etanol).

A amostra é colocada em um recipiente com o líquido com uma densidade previamente definida e levemente agitada. A fração sobrenadante é retirada com o auxílio de uma haste com tela vazada de abertura inferior à granulação da amostra, enquanto que o material pesado sedimenta no líquido do qual é separado posteriormente (Figura 16); em seguida, ambos produtos são lavados com álcool etílico para remoção do bromofórmio dos poros da amostra, filtrados e então secos em estufa.

As alíquotas foram divididas em 3 frações granulométricas para maior eficiência da separação, sendo: -9,5+4,8; -4,8+2,0 e -2,0 mm. A fração mais fina não foi ensaiada por estar abaixo do limite recomendável de separação do aparelho alljig[®] de 2,0 mm.



Figura 16 - Separação em líquido denso com detalhes da retirada do produto flutuado

Dadas as dificuldades de determinação da curva de separabilidade em materiais porosos devido à absorção do líquido, a separabilidade foi também avaliada segundo a massa específica aparente determinada no equipamento Geopyc. O objetivo foi comparar as curvas obtidas e conhecer o desvio na medida da massa específica por líquido denso. Tendo em vista o reduzido tamanho da câmara de amostras, o procedimento foi repetido diversas vezes até que um número representativo de partículas fosse analisado.

5 RESULTADOS

5.1 JIGAGEM DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS

As camadas estratificadas da jigagem foram denominadas C1 a C5, sendo a C1 a camada mais densa, sendo a posicionada na gaveta inferior do recipiente de acrílico, e C5 a mais leve, sendo a gaveta superior do recipiente. As distribuições em massa de agregados reciclados estratificados nessas camadas são apresentadas na Tabela 3, juntamente com a massa específica aparente determinada no Geopyc.

Ao analisar a Tabela 3 nota-se que a massa específica aparente aumenta nas camadas mais inferiores (C1 e C2), principalmente nos ensaios J5 a J8 em que a separação foi realizada na amostra previamente peneirada em 2,0 mm e que representam cerca de 60 a 70% em massa da amostra.

A partir dos resultados de MEA determinados no Geopyc, foram traçadas as curvas de distribuição em massa das camadas em função da massa específica aparente, apresentadas na Figura 17.

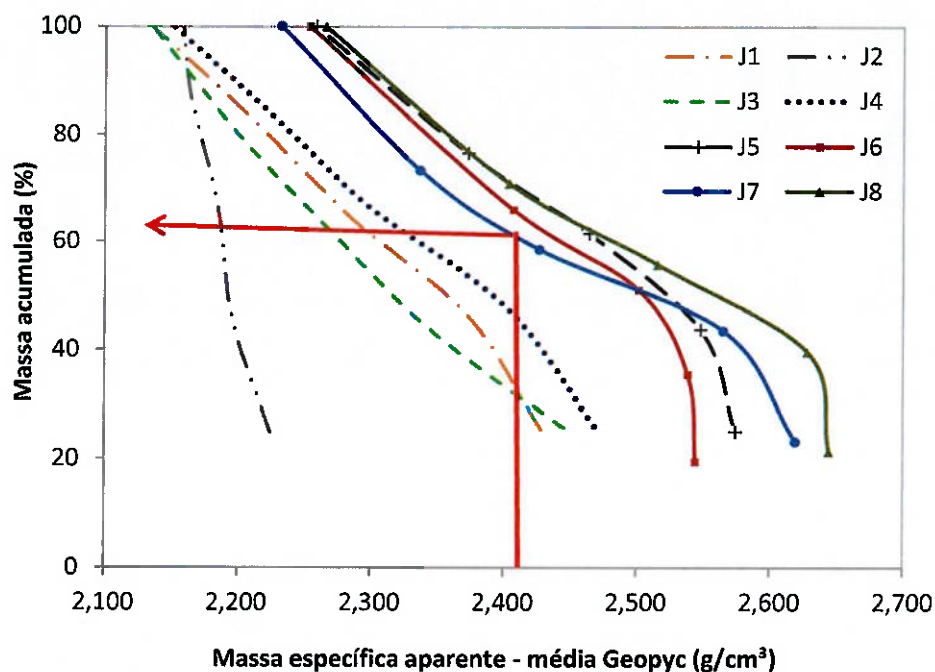


Figura 17 – Distribuição das camadas por massa específica aparente

Tabela 3 – Resultados do ensaio em Geopyc, massa e massa acumulada das camadas dos diferentes ensaios

Ensaio	ID Camada	MEA (g/cm ³)GeoPyc	Massa (%)	Massa acumulada (%)
<9,5mm 50 RPM P=0,12 bar	J1C1	2,43	25,37	25,37
	J1C2	2,31	20,43	45,80
	J1C3	2,07	18,50	64,30
	J1C4	1,95	18,26	82,56
	J1C5	1,77	17,44	100,00
<9,5mm 90 RPM P=0,12 bar	J2C1	2,23	24,91	24,91
	J2C2	2,16	20,52	45,44
	J2C3	2,16	20,90	66,34
	J2C4	2,10	20,44	86,78
	J2C5	2,12	13,22	100,00
<9,5mm 50 RPM P=0,00 bar	J3C1	2,45	25,64	25,64
	J3C2	2,20	18,65	44,29
	J3C3	2,08	19,58	63,87
	J3C4	1,95	16,95	80,82
	J3C5	1,87	19,18	100,00
<9,5mm 90 RPM P=0,00 bar	J4C1	2,47	25,95	25,95
	J4C2	2,33	21,64	47,59
	J4C3	2,04	18,82	66,41
	J4C4	1,94	17,69	84,09
	J4C5	1,77	15,91	100,00
-9,5+2,0 90 RPM P=0,12 bar	J5C1	2,57	25,0	25,0
	J5C2	2,51	18,8	43,8
	J5C3	2,26	17,7	61,5
	J5C4	2,00	15,1	76,6
	J5C5	1,88	23,4	100,0
-9,5+2,0 60 RPM P=0,12 bar	J6C1	2,54	19,4	19,4
	J6C2	2,53	16,0	35,4
	J6C3	2,42	15,5	50,9
	J6C4	2,09	14,9	65,9
	J6C5	1,96	34,1	100,0
-9,5+2,0 90 RPM P=0,00 bar	J7C1	2,62	23,1	23,1
	J7C2	2,50	20,4	43,5
	J7C3	2,02	14,9	58,4
	J7C4	1,98	14,9	73,3
	J7C5	1,95	26,7	100,0
-9,5+2,0 60 RPM P=0,00 bar	J8C1	2,65	21,3	21,3
	J8C2	2,61	18,3	39,6
	J8C3	2,24	16,0	55,7
	J8C4	2,00	15,2	70,9
	J8C5	1,93	29,1	100,0

5.2 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO E FORMA DAS PARTÍCULAS

As curvas de distribuição granulométrica acumuladas no passante e determinadas por análise de imagens dinâmica, das camadas dos ensaios J3 e J8 são apresentadas na Figura 18 e a distribuição dos parâmetros de forma (b/l e esfericidade) na Figura 19 e Figura 20.

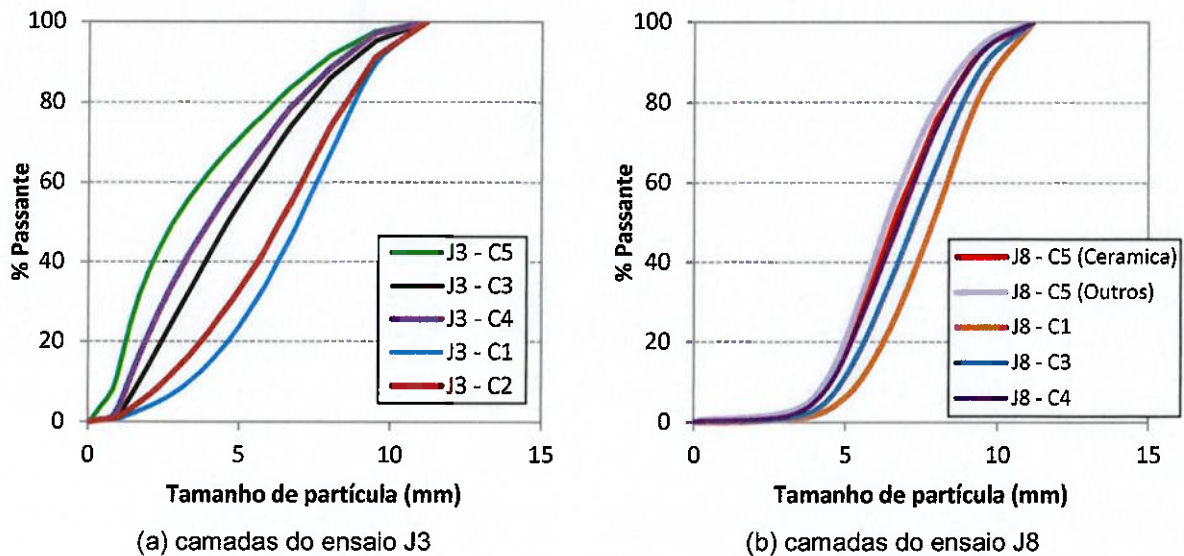


Figura 18 – Distribuição granulométrica acumulada abaixo, ensaios J3 e J8

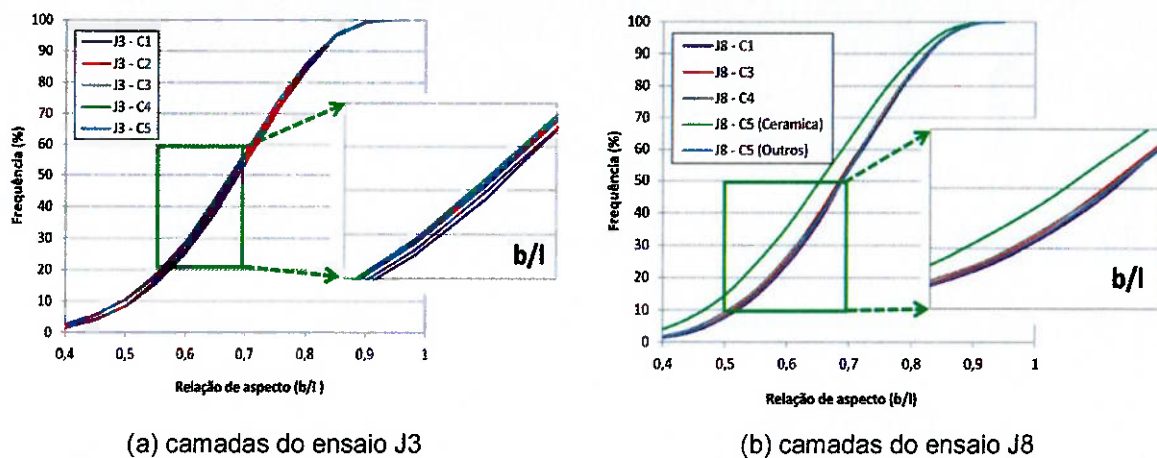
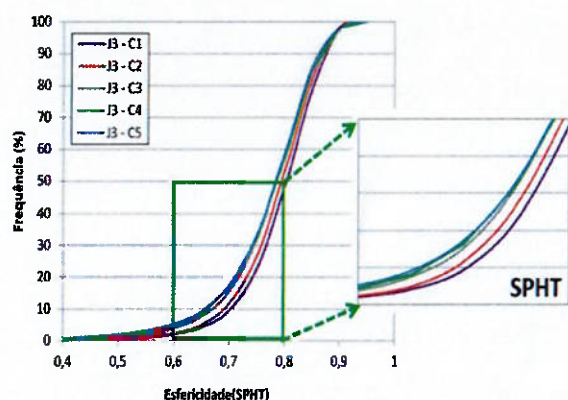
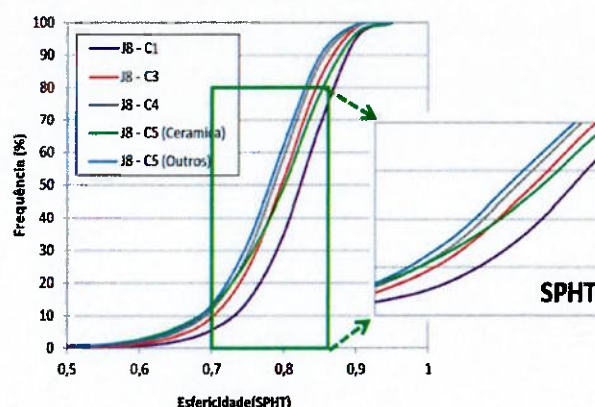


Figura 19 – Distribuição de relação de aspecto b/l acumulada abaixo, ensaios J3 e J8



(a) camadas do ensaio J3



(b) camadas do ensaio J8

Figura 20 – Distribuição de esfericidade acumulada abaixo, ensaios J3 e J8

Através dos gráficos da Figura 19 pode-se perceber que no ensaio J3 verifica-se segregação por tamanho nas camadas estratificadas, enquanto na J8 essa segregação é notada somente na camada mais pesada (C1), composta por partículas discretamente mais grossas.

Tendo em vista a relação de aspecto (b/l), as camadas são muito semelhantes. Exceção à J8C5 na qual a cerâmica apresenta um formato mais alongado.

Com relação a esfericidade, há uma maior semelhança nas camadas do ensaio J3, sendo as mais pesadas, C1 e C2, as que apresentam maior esfericidade. Tal observação se aplica também ao ensaio J8.

5.3 CURVAS DE SEPARABILIDADE POR LÍQUIDO DENSO

As curvas de separabilidade a partir dos resultados dos ensaios de separação em líquido são mostradas abaixo. Fazendo uma leitura individual dos gráficos da Figura 21 e da Figura 22, nota-se que o ensaio J3 foi eficiente ao gerar uma camada pesada com alta densidade (curvas C1), mas as demais camadas ficaram com densidades semelhantes, porém o ensaio J8, apresentou uma camada com densidade muito alta (C1), e as camadas subsequentes também com densidades relativamente mais altas, possibilitado pela geração de uma camada (C5), com baixas densidades.

Analisando-as em conjunto, pode-se perceber que as frações mais finas, entre 4,8 e 2,0mm apresentam maiores densidades, fato explicado por uma melhora na liberação da rocha. Ao comparar as camadas das extremidades dos ensaios, é observado que o ensaio J8 produziu uma camada C1 de melhor qualidade, sendo mais densa (Figura 23a) e o mesmo ensaio, levou a uma camada superior de baixa densidade e portanto pior qualidade (Figura 23b), evidenciando que houve uma melhor segregação do material e a porção de menor densidade se concentrou na camada superior, possibilitando que as camadas inferiores pudessem ter maiores valores de densidade.

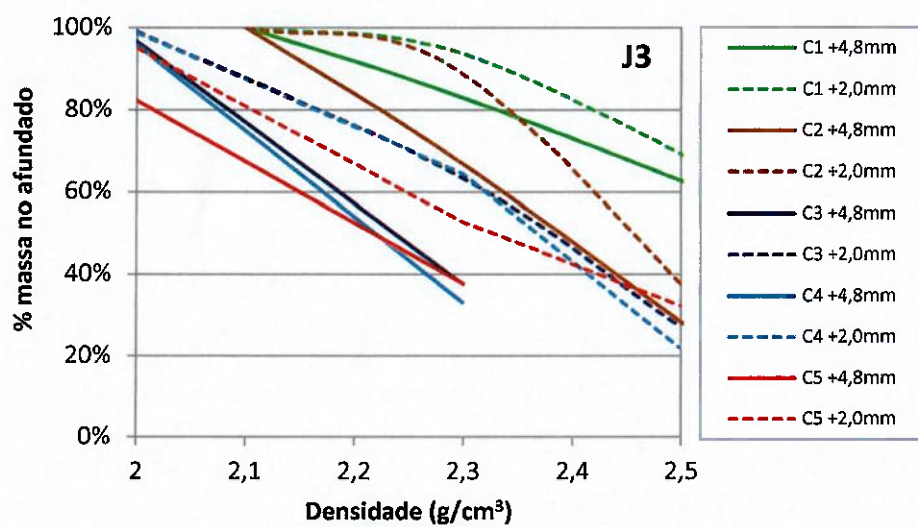


Figura 21 – Curva de partição do ensaio de jigagem J3 das diferentes camadas em duas frações granulométricas

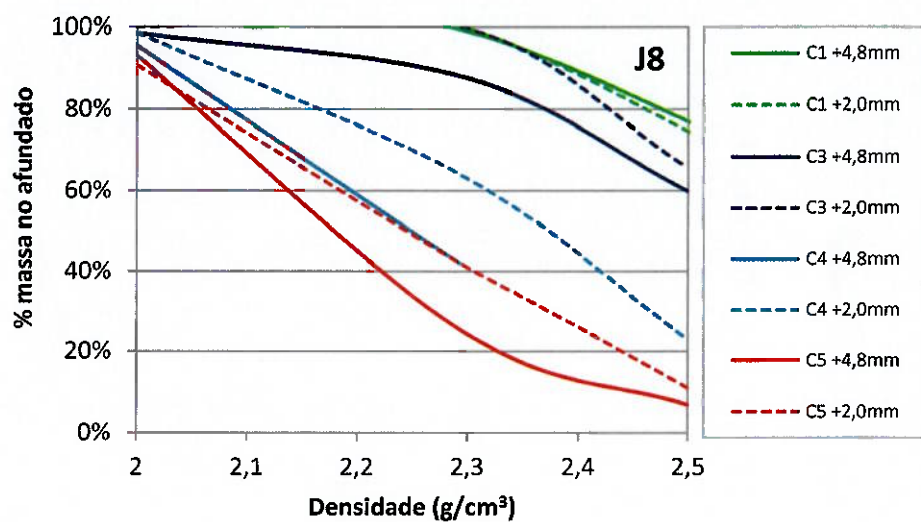
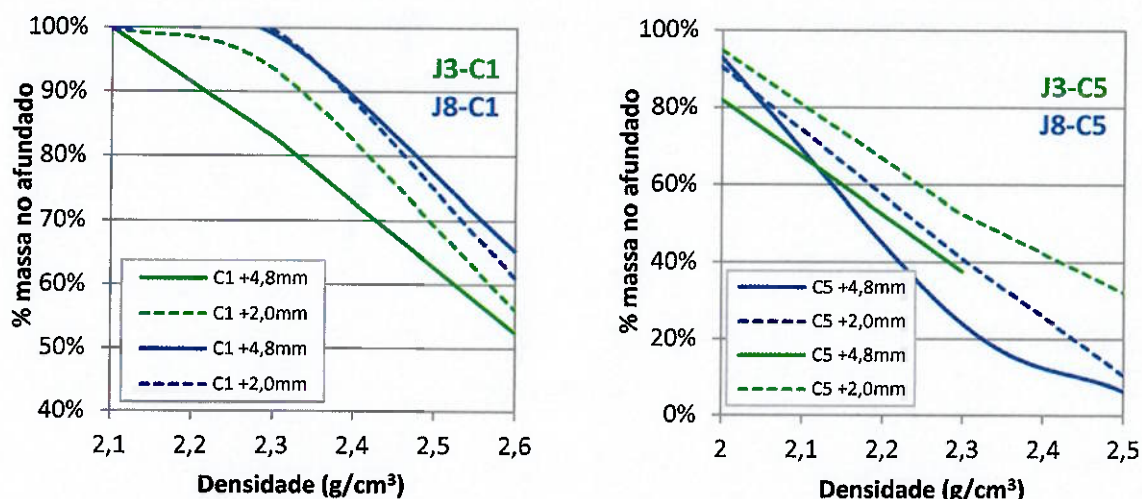


Figura 22 - Curva de partição do ensaio de jigagem J8 das diferentes camadas em duas frações granulométricas



(a) Curvas das camadas inferiores (mais densas)

(b) Curvas das camadas superiores (menos densas)

Figura 23 – Curvas de partição das camadas das extremidades do aparelho alljig® de ambas jigagens

6 CONCLUSÕES

Comparando os dados apresentados, pode ser afirmado que os ensaios se jigagem sem a fração abaixo de 2,0 mm resultam em um produto com maior massa específica aparente (Figura 17 –), com maior recuperação de produtos acumulados no pesado.

Das configurações testadas, o ensaio 3 e o ensaio 8 foram os que proporcionaram maior recuperação em massa nos produtos mais pesados (conforme curvas de partição obtidas por GeoPyc). Dessa forma, a operação com baixa pressão (amplitude de pulso) e baixa frequência de onda foi a configuração que apresentou a melhor condição para a formação de agregado de alta qualidade.

O ensaio de jigagem 8 forneceu os melhores resultados no que se refere à segregação por densidade nas camadas estratificadas, gerando agregados grãos reciclados de menor porosidade (maior massa específica aparente) nas camadas inferiores, com pequenas variações no que se refere à distribuição de tamanho e forma das partículas.

Vale ainda ressaltar que nos ensaios estudados mais detalhadamente, foi evidente uma melhor qualidade das frações mais finas, entre 4,8 e 2,0 mm, devido a uma maior liberação entre a pasta de cimento e fragmentos de rocha anteriormente presentes.

Os resultados obtidos demonstram a separabilidade densitária dos agregados produzidos a partir de resíduos de construção e demolição em jigagem de estratificação

laboratorial alljig. A continuidade dos estudos deverá abordar a possibilidade de produção de agregados de baixa porosidade em equipamentos de jigagem de operação contínua.

A produção de agregados a partir do processamento de resíduos contribui para a redução do consumo de agregados naturais e artificiais, mas também diminuindo os resíduos gerados pela indústria da construção e a preocupação na correta deposição dos mesmos. Não obstante tais possibilidades, este processo pode impulsionar a indústria de reciclagem, ramo em crescimento ao redor do mundo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas): NBR-7211: Agregados para concreto – Especificação. 2005.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos da construção. São Paulo, 2000. 13p. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Agregados para construção civil. Sumário Mineral 2011. Brasília, 2011. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7112> Acesso em 05/05/2013

ANEPAC (Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil). Novo panorama para resíduos de construção e demolição (RCD). Disponível em: Areia & Brita. nº. 44, outubro/novembro/dezembro de 2008, p. 26-7.

ANGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. 2005. 167p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

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

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.; ULSEN, C.; JOHN, V.M.; KAHN, H.; CINCOTTO, M.A. Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. Waste Management, v. 29, p. 721-730, 2009.

BARRA, M.; VAZQUEZ, E. Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation. In: *Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate*, 1998. London. Proceedings. London: 1998. p. 19-30.

- BUNTENBACH, S. et al. 1997. Wet processing of Demolition Rubble. *Aufbereitungstechnik* 38 n.3, p.130-138.
- BURT, R. O. Gravity concentration technology. Amsterdam: Elsevier, 1984. 605 p.
- CACHIM, P. B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 3, p. 1292-1297, 2009.
- CACHIM, P. B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 3, p. 1292-1297, 2009.
- CALLISTER, W. D. Fundamentals os materials science and engineering. Wiley, 2000.
- CHAVES, A.P. Métodos Gravíticos. Material didático – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.
- CHAVES, A.P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Separação densitária. Oficina de textos. São Paulo, 2013.
- CHAVES, A.P. Texto para o concurso de professor titular – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.
- CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 1, p 125-132, 2003
- CONAMA. Resolução no 307. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, M. D. C., SECRETARIA NACIONAL DA HABITAÇÃO: Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/02 2002.
- DAMINELI, B. L. Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. 2007. 107p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- DE JUAN, M. S.; GUTIERREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 872-877, 2009.
- DECONCIC (Departamento da Indústria da Construção). Proposta de política industrial para a construção civil – Edificações. Caderno 1. São Paulo, 2008.
- DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral): Sumário Mineral 2012. Brasília, 2012, volume 32, 136p.
- FANDRICH, R. et al. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *International Journal of Mineral Processing*, v. 84, p. 310-320, 2007.
- GAUDIN, A. M. Principles of mineral dressing. New York: MacGraw-Hill, 1932. 554p.
- GOES, M. A. C et al. Amostragem. In: LUZ, A.B. et al. Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT, 1998. p. 17-57.

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

GONÇALVES, M. et al. Produção de areia de brita com qualidade. *Areia & Brita*, v. 10, p. 20-25, 2000.

GRIM, R. E. Clay mineralogy. New York: McGraw-Hill, 1953.

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

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International- Design and Construction*, v. 5, n. 1, p. 79-83, 1983.

HAWLITSCHKE, G; ULSEN, C.; análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas, Brasil Mineral, São Paulo, n. 329, p. 82-85, 2013

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDS. ISO 13322-1 *Particle size analysis - Image analysis methods - Part 1: Static image analysis methods*. STANDARDIZATION, I. O. F.: 39 p. 2004.

ISO 13322-2 *Particle size analysis -- Image analysis methods -- Part 2: Dynamic image analysis methods*. STANDARDIZATION, I. O. F. 2006.

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

JONES, M. P. Applied mineralogy - a quantitative approach. United States: Graham & Trotman, 1987. 259 p.

JONES, M. P. Applied mineralogy – a quantitative approach. United States: Graham & Trotman, 1987. 259 p.

KELLY, E. C.; SPOTTISWOOD, J. Introduction to mineral processing. New York. Ed. John Willey. 1982. 492p.

KOBAYASHI, S.; KAWANO, H. Properties and usage of recycled aggregate concrete. Demolition and reuse of concrete and masonry: reuse of demolition waste. London: Chapman & Hall, 1988.

KOHLER, U.; LIST, J. Experiences with dry dispersion and high-speed image analysis for size and shape characterisation. In: *Particulate Systems Analysis*, 2005. Stratford uopn Avon. Proceedings. Stratford uopn Avon: 2005. p. 5.

LAMOND, J. F. et al. Removal and reuse of hardened concrete: reported by ACI committee 555. *ACI Materials Journal*, v. 99, n. 3, p. 300-325, 2002.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 11, p. 1975-1980, 2004

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. Manual de agregados para construção civil; CETEM. Rio de Janeiro. 2012.

MACEDO, A. B. Dossiê Recursos Naturais – Recursos minerais não-metálicos. São Paulo, 1998, volume 12, nº. 33, p. 67-87. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141998000200005> Acesso em 21/04/2013

MAINWARING, P. R.; PETRUK, W. Introduction to image analysis in the earth and mineral sciences, In: PETRUK, W., *Short course on image analysis applied to mineral and earth sciences*, 1989. Ottawa. Proceedings. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, 1989. P. 1-4.

MILLER, N. A.; HENDERSON, J. J. Quantifying Sand Particle Shape Complexity using a Dynamic, Digital Imaging Technique. *Agronomy Journal*, v. 102, n. 5, p. 1407-1414, 2010.

MUELLER, A.; WIENKE, L. 2004. Measurements and models for the gravity concentration of C&D waste through jigging. In: International Rilem Conference on the use of recycled materials in building and structures, Elsevier, France, v.1, p. 115-122.

NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. 2000.

NBR-15155: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. 2004.

NBR-7223: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1982.

NISHBAYASHI, S.; YAMURA, K. Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse aggregate prepared by crushing concrete. In: *Second international rilem symposium on demolition and reuse of concrete and masonry*, 1988. Japan. Proceedings. Japan: 1988. p. 652-659.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 6, p. 461-468, 2004.

- QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. Optimization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory. *Construction and Building Materials*, v. 20, n. 10, p. 1069-1078, 2006.
- RAVINDRARAJAH, R. S.; TAM, C. T. PROPERTIES OF CONCRETE MADE WITH CRUSHED CONCRETE AS COARSE AGGREGATE. *Magazine of Concrete Research*, v. 37, n. 130, p. 29-38, 1985.
- RUSS, J. C. Practical stereology. Plenum, 1986.
- SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. *Beneficiamento Gravimétrico*. 1. Editora UFRGS, 2005a. 603 p.
- SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. *Beneficiamento Gravimétrico*. 1. Editora UFRGS, 2005a. 603 p.
- 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. 1997. 29p.
- STEEN, B.; BORG, G. An estimation of the cost of sustainable production of metal concentrates from the earth's crust. *Ecological Economics*, v. 42, n. 3, p. 401-413, 2002.
- ULSEN, C. et al. Technological Characterization of Fine Fraction from C&D Waste. In: *Progress of Recycling in the Built Environment*, 2009. São Paulo. Proceedings. São Paulo: Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, 2011. (in press).
- UNDERWOOD, E. E. Quantitative stereology. Addison-Wesley Pub. Co, 1970. 274 p.
- VAN VLACK, L. Princípios de ciência dos materiais. São Paulo: E. Blücher, 1970.
- WEBB, P. A.; ORR, C. Analytical Methods in Fine Particle Technology. 1 edition. Norcross, USA: Micromeritics Instrument Corporation, 1997. 301 p.
- YAGISHITA, F.; SANO, M.; YAMADA, M. Behaviour of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate. In: LAURITZEN, E. K., RILEM, 1994. Odense. Proceedings. Odense: 1994. p. 331-342.