

RENATO IWAMOTO FERREIRA

ESTUDOS DE SEPARABILIDADE DE AREIA RECICLADA

São Paulo

2010

RENATO IWAMOTO FERREIRA

ESTUDOS DE SEPARABILIDADE DE AREIA RECICLADA

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: Ms.C. Carina Ulsen

Co-Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

São Paulo

2010

TF-2010

F414e

num 2169590

M2010f

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700008348

FICHA CATALOGRÁFICA

Ferreira, Renato Iwamoto

Estudos de separabilidade de areia reciclada / R.I. Ferreira. -- São Paulo, 2010.

.35 p.

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

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

AGRADECIMENTOS

À doutoranda Carina Ulsen e ao Prof. Dr. Henrique Kahn por me apoiarem e ensinarem durante o período de pesquisa no laboratório e, principalmente, por confiarem a mim este trabalho.

Agradeço também todos os outros membros da equipe do LCT, local em que foi desenvolvido o trabalho: Erílio, Carlão, Rafão, Rafael, Juscelino, Vavá, Ailton, Douglas, Lino que não pouparam esforços para ensinar as práticas laboratoriais.

Aos amigos de curso e laboratório que estiveram sempre presentes para ajudar tanto para fins acadêmicos como pessoais: Gustav (parceiro de pesquisa), Rafael França, Lucas Bruson, Renato Higa, Renato Nunes, Cheng, Wellington, Célio, Daniel, Juliana, Adriana e Igor.

À toda turma de engenharia de minas que se formará este ano de 2010 (se deixarem) e alguns que se formaram no ano passado e outros que se formarão ano que vem.

E finalmente, aos pais, irmão e namorada por ajudarem sempre fora do ambiente acadêmico.

RESUMO

O presente trabalho apresenta estudos de separabilidade de areia reciclada com o objetivo de melhorar a qualidade desse material. O foco principal foi a remoção de materiais que contêm pasta de cimento, pois esta apresenta baixa resistência mecânica, fato que diminui a qualidade da areia. As propriedades diferenciadoras avaliadas entre a pasta de cimento e os componentes de areia (sílica e alguns óxidos) estudados neste trabalho são a densidade e susceptibilidade magnética.

O estudo de separação por densidades foi feito em um elutriador com amostras de faixas granulométricas estreitas, o que apresentou bons resultados, resultando em produtos pesados com baixos conteúdos de pasta de cimento.

Para o estudo de susceptibilidade magnética foram feitos dois tipos de ensaios. Primeiramente foram realizadas separações no separador eletromagnético do tipo Frantz de barreiras, seguindo-se ensaios em Re-roll; ambos demonstraram grande potencial na concentração das partículas de areia com menor conteúdo de pasta de cimento aderida e também redução nas proporções de cerâmica.

Ambos os estudos (densitários e magnéticos) se mostraram efetivos na diminuição do conteúdo de pasta de cimento e apresentaram recuperações em massa significantes (80% para elutriação e 64% para a separação magnética). No início a amostra continha cerca de 16,7% da soma de CaO mais perda ao fogo; os produtos de separação chegaram à soma de 9,7% na elutriação e 8,3% na separação magnética. Outro fator que marca a melhoria do material é o teor de sílica mais óxidos de alumínio e ferro que na amostra inicial era de 78% e os concentrados apresentaram 85% na elutriação e 87% na separação magnética.

Palavras-chave: areia reciclada, caracterização tecnológica, separabilidade.

ABSTRACT

This paper presents separability studies on recycled sand in order to improve the quality of the material. The main focus was to remove materials containing cement paste, since it has low mechanical strength, a fact that diminishes the quality of the sand. The properties that differ cement paste from the components of sand (silica and some oxides) used in this study are the density and magnetic susceptibility.

The density separation study was performed on an elutriator with samples of narrow particle sizes, which showed good results, obtaining sink products with low content of cement paste.

Concerning the magnetic separation study, two types of tests were performed. Initially, separations on the barrier Frantz electromagnetic separator and then on Re-roll separator; both results showed good efficiency on the removal of porous cement paste and ceramic particles.

Both studies (density and magnetic) were effective in reducing the content of cement paste and showed significant mass recovery (80% for elutriation and 64% for magnetic separation). The initial sample contained about 16.7% CaO+LOI, on the products from mineral separations this grade decreased to 9.7% in elutriation and 8.3% in magnetic separation. Another factor that marks the quality improvement of the material is the grade of silica, oxides of aluminum and iron; on the initial sample it was 78% and on the final products it rises to 82% in elutriation and 87% in magnetic separation.

Key words: recycled sand, technological characterization, separability.

LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 1 – Comparativo da produção anual de agregados	10
Figura 2 – Amostrador tipo Jones	14
Figura 3 – Esquema de um elutriador e elutriador usado.....	16
Figura 4 – Separadores eletromagnéticos Frantz	17
Figura 5 - Separador magnético de rolo de terras raras.....	17
Figura 6 – Fluxograma da origem do material	18
Figura 7 - Fluxograma no ensaio em RE-roll.....	19
Figura 8 - Correlação entre a vazão de fluido e recuperação em massa no produto leve para cada intervalo granulométrico	21
Figura 9 - Difractogramas comparativos dos produtos da elutriação de três frações	23
Figura 10 - Imagens de produtos leve e pesado da elutriação; fração entre 1,0 e a,15 mm.....	24
Figura 11 - Difractogramas comparativos de produtos da separação magnética para a fração -2,0+1,2mm	27
Figura 12 - Imagens de produtos de separação magnética em Frantz; fração -1,2+0,6 mm....	27
Figura 13 - Imagens de produtos de separação magnética em Frantz; fração -0,3+0,15 mm.....	28
Figura 14 - Foto dos produtos Magnético e Não Magnético em RE-roll, 115 rpm, alimentação de 2,51 g/(pol.s) - Fração -1,2 +0,15 mm	31

LISTA DE TABELAS

	pag.
Tabela 1 - Análise granuloquímica da amostra inicial	20
Tabela 2 – Composição dos produtos da elutriação	22
Tabela 3 - Estimativa da composição mineralógica de produtos selecionados da elutriação	23
Tabela 4 - Teores e distribuição dos principais óxidos e massa nos produtos da separação magnética.....	26
Tabela 5 – Parâmetro e balanços de massa dos ensaios RE-roll	29
Tabela 6 – Teores de SiO e CaO nos diversos produtos do Re-roll.....	29
Tabela 7 – Balanços de massa dos ensaios de separação magnética	30
Tabela 8 - Teores e distribuição dos principais óxidos e massa nos produtos da separação magnética por RE-roll nas diferentes condições	30
Tabela 9 - Comparação entre resultados de separabilidade por elutriação e separação magnética.....	32

SUMÁRIO

	pag.
1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVO	9
2.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVAS.....	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1 AGREGADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	9
3.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	10
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA FRAÇÃO AREIA DO RCD	11
3.4 PROCESSAMENTO DE RCD	11
3.4.1 <i>Liberação da pasta de cimento</i>	12
3.4.2 <i>Produção de areia reciclada</i>	13
3.5 CARACTERIZAÇÃO DE PRODUTOS.....	13
3.5.1 <i>Amostragem</i>	13
3.5.2 <i>Composição química</i>	14
3.5.3 <i>Difratometria de Raios X</i>	15
3.5.4 <i>Estimativa do teor de pasta de cimento</i>	15
3.5.5 <i>Separações minerais</i>	15
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1 AMOSTRA.....	17
4.2 ELUTRIAÇÃO.....	18
4.2.1 <i>Caracterização dos produtos da elutriação</i>	18
4.3 ESTUDO DE SEPARABILIDADE EM FRANTZ DE BARREIRAS	19
4.4 ESTUDO DE SEPARABILIDADE EM ROLOS DE TERRAS RARAS (RE-ROLL).....	19
4.4.1 <i>Caracterização dos produtos da separação magnética</i>	20
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
5.1 MATERIAL INICIAL	20
5.2 ELUTRIAÇÃO.....	20
5.3 SEPARAÇÃO NO FRANTZ.....	25
5.4 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA EM EQUIPAMENTO RE-ROLL	28
5.4.1 <i>Determinação de paranâmetro</i>	28
5.4.2 <i>Produtos gerados</i>	29
6 CONCLUSÕES	32
7 REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são um dos principais responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterros em cidades de médio e grande porte, uma vez que eles correspondem a mais de 50% em massa dos resíduos sólidos urbanos. No Brasil, estima-se que são gerados anualmente cerca de 70 milhões de toneladas de RCD que, quando dispostos em locais irregulares, causam grandes impactos ambientais, além de representarem altos custos sócio-econômicos - coleta-transporte-deposição, cerca de R\$ 45,0 x 10⁶/ano (Pinto 1999, John 2000, Commission 2000, Schneider 2003). Dessa forma, a reciclagem de RCD é uma forma de aproximar o setor da construção civil da sustentabilidade.

A deposição dos resíduos da construção civil tem sido um grande impasse para as administrações públicas. A proibição pelos órgãos governamentais (CONAMA 2002) da deposição destes em aterros sanitários, somada ao esgotamento de áreas destinadas a essa finalidade e aos aumentos do custo das matérias primas naturais, tem incentivado o desenvolvimentos da reciclagem destes resíduos.

A reciclagem do RCD é tecnicamente viável, dada sua composição predominantemente mineral (mais de 90%), tanto no Brasil como em países europeus (Carneiro et al. 2000, Ferraz 2001, Commission 2000). Os principais componentes são concreto, argamassa, telhas, tijolo, solo, plásticos, metais, madeira, papel, betume, dentre outros. Do ponto de vista químico, os RCD brasileiros são constituídos majoritariamente por sílica, encontrando-se alumina e óxido de cálcio em menores proporções (Angulo 2002a).

A potencialidade da reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) vem sendo estudada e demonstrada há pouco menos de dez anos; entretanto, em todas as linhas de pesquisa desenvolvidas sempre encontram-se restrições para a aplicação do material reciclado. Para superar tais barreiras e garantir a aplicação do RCD reciclado em diversos ramos da construção civil é necessário aprofundar o conhecimento nas características do material reciclado e a influência que cada uma delas exerce no produto final. Dentre estas citam-se: características de associações microestruturais (associação da pasta de cimento com o agregado natural), morfologia das partículas e efeito na reologia de argamassas e concretos, influência da área de superfície específica, da distribuição granulométrica e porosidade do material.

A tecnologia de processamento e o seu controle são de fundamental para a produção de agregados reciclados com qualidade compatível à dos agregados naturais. Processos inadequados aplicados na reciclagem geram partículas de formas inapropriadas, influenciando significativamente o comportamento (reologia) dos concretos e argamassas moldados com agregados reciclados, o que implica no aumento do consumo de cimento. Em argamassas, a forma das partículas (grau de arredondamento e esfericidade) é o fator geométrico mais relevante, uma vez que este afeta diretamente a trabalhabilidade e a compacidade destas. Analogamente, a otimização da distribuição granulométrica permite uma redução significativa do consumo de cimento, corroborando com as práticas de sustentabilidade.

2 OBJETIVO

O objetivo do trabalho foi avaliar as possibilidades de diminuição do conteúdo de pasta cimentícia associada a agregados miúdos de RCD (fração areia) mediante estudos de separabilidade através de elutriação em intervalos granulométricos estreitos e separação magnética de média/alta intensidade de campo.

2.1 Relevância e justificativas

O esgotamento da produção de areia e brita próximos aos grandes centros consumidores, particularmente em São Paulo, tem aumentado sobremaneira o custo final destes produtos, uma vez que o frete pode representar até 2/3 deste valor. Além disso, o impacto ambiental e a recuperação das áreas degradadas pelas atividades extrativas, particularmente de areia, são pouco considerados, tendo em vista a existência de “empreendimentos ilegais” que atuam no setor.

A produção de areia de RCD é, portanto, interessante tanto do ponto de vista ambiental (redução da extração de recursos não renováveis e da quantidade de resíduos depositados ilegalmente), como econômico (combustíveis, desgaste de rodovias...), além de altamente valorizada pelo movimento de construção sustentável. No aspecto social pode destacar a participação de cooperativas na operação das usinas de reciclagem, na capacitação de mão-de-obra e na utilização de agregados reciclados em obras populares, além da redução do tráfego de veículos pesados nos grandes centros urbanos e cercanias como decorrência da substituição de areia natural pela reciclada.

Tecnicamente os agregados de RCD mostram uma distribuição granulométrica na qual cerca da metade da massa gerada refere-se à fração de agregado miúdo (Ulsen et al. 2010a), que atualmente não tem mercado de maior valor devido a sua baixa qualidade e elevado conteúdo de solo e contaminantes (Angulo, Ulsen et al., 2009b - essencialmente restrito a base de pavimentos). Nesse caso, o desenvolvimento de novas tecnologias de processamento que visem à melhoria da qualidade dos produtos é imprescindível, tal como o controle de qualidade dos produtos gerados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Agregados na construção civil

Define-se como agregado o “material sem forma ou volume definido, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto” (ABNT 2005). A norma (ABNT 1997) subdivide os agregados em dois grupos de acordo com sua granulometria: agregado graúdo, que corresponde ao “material granular” com pelo menos 95% em massa retida na peneira com abertura de malha de 4,75 mm; agregado miúdo, este grupo corresponde ao “material” com pelo menos 95% em massa passante na malha de abertura de 4,75.

O maior consumidor de recursos naturais não renováveis é o mercado da construção civil, que consome de 14 a 50% da produção desses recursos. Na Inglaterra este consumo é de 6.000kg/ano (Hobbs e Hurley, 2001).

No Brasil, um dos bens minerais mais consumidos é o agregado britado, sendo que 90% da produção são destinados 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. Estudo (Rangel et al. 1997) indicou um consumo de $12 \times 10^6 \text{ m}^3$ de areia/ano só na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), ultrapassando 1 milhão de viagens de caminhões por ano (Coelho 2001).

Na RMSP já se pode perceber a redução do número de jazidas de areias. As consequências do aumento das distâncias de transporte entre a fonte de matéria-prima e o mercado consumidor são: aumento do consumo e queima de combustíveis fósseis e emissão de CO_2 , aumento do tráfego de caminhões nos centros urbanos, desgastes de pavimentos, entre outros, aumento significativo do custo do produto final, encarecimento das obras de construção, etc.

A produção anual de agregados (areia e brita) estava estagnada até meados de 2006, após esse período verifica-se uma tendência crescente no aumento da produção dado o crescimento econômico do país e do mercado da construção civil. Esse crescimento é mais acentuado nos últimos três anos (Figura 1).

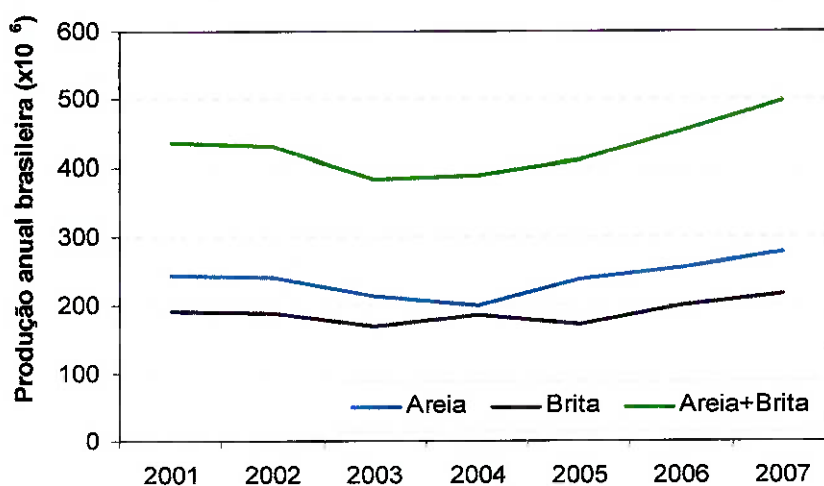


Figura 1 – Comparativo da produção anual de agregados

3.2 Resíduos de construção e demolição

Embora sejam chamados popularmente como entulho ou metralha, os resíduos provenientes de atividades de construção, reformas e demolição são denominados “Resíduos de Construção e Demolição” (RCD), por alguns autores (Angulo 2000, Ferraz 2001, Commission 2000, Wilson 1996, Schultmann e Rentz 2000).

Outros autores também definem RCD como: “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 em um dos itens acima” (Biocycle 1996, apud Zordan 1997).

O volume gerado de RCD no Brasil é difícil quantificar, porém há estudos que mostram uma média de 500 kg/ano.habitante (Angulo 2002a). Esses resíduos podem representar até

70% de todo o resíduo sólido gerado em centros urbanos e 90% deste é de origem mineral, que pode ser reciclado por processos de beneficiamento mineral.

No presente trabalho, a denominação RCD será referente à fração mineral dos resíduos advindos das atividades da construção civil e de demolições.

3.3 Caracterização da fração areia do RCD

A distribuição granulométrica dos agregados de diferentes RCDs mostra que quase metade (média de 40%) de sua massa é composta pela fração miúda ou fração areia, abaixo de 4,75 mm (Ulsen et al. 2010a).

Apesar de representar uma grande massa e, conseqüentemente, grande importância, esta fração tem pouco espaço no mercado porque ela é pouco estudada e apresenta baixa qualidade devido à presença de contaminantes. Por isso, é de fundamental importância desenvolver métodos de caracterização e alternativas de processamento para o tratamento desta fração

3.4 Processamento de RCD

O processamento de RCD no Brasil resume-se a etapas de britagem e peneiramento. Na cidade de São Paulo, foi instalada em 1999 uma operação para a reciclagem de resíduos de concreto. O objetivo da instalação era processar esse RCD para aterrar uma pedreira da região. Para isso a instalação contava com um britador de mandíbulas com capacidade de 100 t/h, peneiramento a seco com 3 diferentes malhas, separador magnético e seleção manual de produtos indesejáveis (Angulo 2000).

Na Europa algumas usinas de reciclagem usam tecnologias de tratamento de minérios para melhoria da qualidade do seu produto final. A usina BBw Recycling Mittelelbe, localizada em Magdeburg, Alemanha, processa RCD com dois estágios de britagem. O primeiro estágio é um britador de mandíbulas e o segundo um britador de impactos. Para o auxílio da operação há dois extratores de sucata, um na alimentação do britador de impactos, o que também protege o britador, e outro para os finos da britagem (Angulo and Mueller 2009).

O produto do britador de impactos é submetido a um processo de lavagem, para remover materiais finos e orgânicos. Depois o agregado é peneirado, obtendo-se três diferentes produtos: -45+32 mm, -32+16 mm, -16+8 mm. Duas frações são removidas do processo e descartadas: Os finos que alimentam o processo, que são as partículas passantes na grelha de 16 mm situada antes do britador primário. A outra fração removida corresponde aos finos depois da lavagem com dimensões menores que 8 mm. Isso ocorre porque elas estão muito contaminadas, ou seja, podem conter impurezas, como a própria matéria orgânica, que diminui a qualidade do material reciclado.

Não há muito conhecimento na literatura de usinas de beneficiamento para obtenção de areia reciclada, tendo em vista a dificuldade em se operar usinas para frações finas, pois geram mais poeira e demandam equipamentos com maior eficiência, tornando o processo mais caro tanto na questão de aquisição de equipamentos e pelo controle de segurança. Outro fator é ao interesse dado aos agregados graúdos por se acreditar que os contaminantes estão concentrados na fração fina.

3.4.1 Liberação da pasta de cimento

O concreto é composto por cerca de 70-80%, em volume, por agregados – brita e areia (Nagataki et al. 2004). Dessa forma, a reciclagem de concretos de edificações anteriores pode suprir parte da demanda de agregados para novas construções e ainda contribuir para a não geração de resíduos depositados em aterros de inertes, contribuindo para a sustentabilidade no setor da construção.

No Brasil, esse processo ainda é simples e com pouco aporte de tecnologia; os processos não são otimizados e apresentam baixa eficiência. O processo se resume a uma etapa de britagem seguida de peneiramento; a remoção dos componentes de aço é feito por um extrator de metais (presente em algumas usinas) e a remoção de contaminantes, matéria orgânica, é feita manualmente.

No entanto, a produção de agregados reciclados para uso em concretos ou outras aplicações mais nobres depende da remoção da pasta de cimento dos agregados gerados a partir de resíduos (Etxeberria, Vazquez e Mari 2006). Portanto, as tecnologias de processamento são direcionadas para remoção desse material, porque quanto mais pasta de cimento nos agregados reciclados, maior sua porosidade, e logo menor sua resistência mecânica.

Desse modo é difícil produzir agregados graúdos e areias recicladas de alta qualidade (baixa porosidade) nas instalações presentes no Brasil, porque não há nenhum processo eficiente para remover a pasta de cimento do agregado.

Um fator decisivo na remoção da pasta de cimento são as etapas de atrição que o material sofre; este processo pode ser intensificado nas etapas de cominuição, ou seja, quanto maior o número de estágios de britagem, maior a possibilidade de remoção da pasta de cimento; porém mais caro o processo e maior a geração de finos.

Há estudos que mostram que usando um britador de mandíbulas como britador primário e um britador de impacto como secundário, são gerados 40% de produto na fração miúda (Nagataki et al. 2004). Por outro lado, adicionando-se em número mais elevado de etapas de cominuição, obtém-se um produto de melhor qualidade (maior atrição e remoção da pasta de cimento), porém a custas do aumento da quantidade de finos gerados.

Os processos de britagem envolvidos na reciclagem de RCD, apesar de determinante, são poucos discutidos. O produto gerado por uma britagem de mandíbulas pode ser diferente do produto gerado por britagem de impacto, porque a forma em que acontece a fragmentação do material é diferente. Com isso geram produtos com características diferentes que podem ser ou não boas para a reutilização dos RCDs.

O estudo desenvolvido por Etxeberria (Etxeberria et al. 2007) usou um britador de impacto para a produção de agregados e demonstrou a possibilidade de se obter agregados reciclados com baixo teor de pasta de cimento. Outro estudo (Gress, Snyder e Sturtevant 2009) mostra que britadores de mandíbulas produzem agregados graúdos reciclados com teores de pasta de cimento mais elevados.

Outro parâmetro usado para verificar a qualidade dos agregados é a sua forma. Há estudos (Lee et al. 2008) que concluem que a produção de agregados graúdos com dois estágios de britagem, o mais recomendado é usar o britador de mandíbulas para o primeiro estágio e o de impacto no segundo.

Outros parâmetros de fundamental importância na avaliação da qualidade dos agregados reciclados são: porosidade dos grãos, absorção de água, massa específica aparente e distribuição granulométrica.

3.4.2 Produção de areia reciclada

A areia reciclada é composta por todas as frações menores que 4,8 mm resultantes da quebra do material de maior fragilidade nas etapas de manuseio e cominuição e dos resíduos. Por isso, entre outros fatores, acredita-se que a areia reciclada deve ser evitada como matéria-prima para a construção civil, pelos altos teores de contaminantes (principalmente solo) e pela alta porosidade e absorção de água.

Esta fração, embora represente um grande montante dos produtos da reciclagem (Ulsen et al. 2010a) recebe pouca atenção. Embora seja possível usar métodos e técnicas de tratamento de minérios para melhorar a qualidade das areias recicladas, eles são pouco estudados.

A britagem feita por um britador de impacto vertical (VSI-Vertical Shaft Impactor) para a produção de areia artificial (pó de pedras) vem sendo muito usada desde os anos 90. Isso porque este equipamento proporciona o impacto de partícula contra partícula, fazendo com que haja uma elevada redução do tamanho aliado a redução de angulosidade das areias (Minerals 2005).

O britador VSI é também um britador de impacto, porém de eixo vertical. 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 (Minerals 2005).

As principais vantagens operacionais do britador VSI são:

- poucos serviços de manutenção e baixos custos operacionais;
- tecnologia de rocha-contra-rocha minimiza gastos com peças de desgaste;
- capacidade de se controlar a granulometria do produto, maximizando ou diminuindo a geração de finos;
- produto com formato cúbico;

Por outro lado, a principal desvantagem é o elevado custo de aquisição, por se tratar de um equipamento de produção de alta qualidade.

3.5 Caracterização de produtos

3.5.1 Amostragem

A amostragem é uma etapa fundamental para a representatividade, robustez e significância do estudo. Por isso, ela deve ser feita criteriosamente, de forma que as alíquotas representem o melhor possível a totalidade das amostras, para isso é necessário que as alíquotas contenham características do todo, ou seja, que tenha todas as características do material amostrado (como distribuição granulométrica, composição química, propriedades físicas, densidade, etc.) (Sampaio e Tavares 2005).

Portanto, a amostragem deve ser sempre considerada como etapa fundamental dos projetos de caracterização e simulação de processo, caso contrário todos os resultados obtidos serão comprometidos (não serão representativos).

Inicialmente inicia-se o estudo com uma amostragem primária, na qual o material é recolhido de uma fonte de amostras/produtos para um estudo ou análise subsequente. Em seguida, faz-se uma segunda etapa de amostragem (amostragem secundária) a partir do material previamente amostrado para obtenção de uma alíquota ainda menor. Para realizar a amostragem há instrumentos ou técnicas definidas.

Amostragem em pilha alongada: Esse processo é recomendado para amostras iniciais que contenham grandes quantidades de massa (mais que 50kg). O processo consiste em espalhar o material na forma de uma pilha reta, onde o material deve ser derramado de forma constante e sempre contínuo, indo e vindo sobre a reta. Depois deve-se redistribuir as pontas sobre a pilha. Neste ponto pode-se recolher a amostra que deve ser no mínimo um décimo da pilha (Sampaio, França e Braga 2007).

Amostrador do tipo Jones: Esse amostrador é usado para amostras com quantidade de massa menores (menos que 50 kg). Ele consiste de um equipamento composto por diversas calhas verticais que despejam a amostra para dois receptores diferentes, metade das calhas para um lado e a outra metade para o outro de forma alternada (Figura 2). Assim, a amostra é dividida ao meio mantendo suas características (Sampaio et al. 2007).



Figura 2 – Amostrador tipo Jones

3.5.2 Composição química

A principal técnica utilizada para determinar a composição química de amostras minerais e outros é a Fluorescência de Raios-X (FRX), que pode quantificar os componentes químicos presentes e suas quantidades relativas.

Para analisar a composição química pode-se utilizar a técnica de espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX), que permite a determinação da composição química quantitativa da amostra.

Esta técnica consiste em usar uma fonte de radiação que incide na amostra excitando os átomos presentes na material. Os átomos respondem a essa excitação liberando um espectro de energia (Bish e Post, 1989); cada átomo tem um espectro de energia próprio (característico).

O estudo da composição química é de extrema importância para avaliar areias recicladas para poder quantificar a presença de contaminantes como o cálcio e materiais voláteis (relativos à perda ao fogo - PF), pois estes materiais são os que diminuem a resistência mecânica das areias recicladas. Outros teores importantes são os de silício e óxidos de ferro e alumínio que são os componentes principais das rochas que geraram os primeiros agregados e areias como granitos, feldspatos, silicatos e outros (Ulsen et al. 2010b).

3.5.3 Difratometria de Raios X

Para analisar a composição mineralógica das amostras pode-se usar a técnica de Difratometria de Raios X (DRX), que permite identificar e quantificar fases minerais presentes na amostra a partir do espectro gerado pela sua estrutura cristalina. Cada composto mineral detém um padrão difratométrico característico. O raios X incidem sobre a amostra e faz com que os elétrons presentes na material vibrem, estes por sua vez espalham coerentemente a radiação incidida de acordo com o arranjo e elementos ligados, sendo único para cada mineral (Bish e Post, 1989).

As respostas dos elétrons são captadas por um difratômetro que gera um gráfico de intensidade recebida por ângulo de incidência da radiação; cada mineral tem sua resposta característica é isso que permite determinar as fases presentes, As intensidades difratadas permitem ainda avaliar quantitativamente as fases presentes

Esse dado é importante quando se trata de reciclagem de RCD, pois alguns minerais como quartzo e o feldspato são de grande interesse e, em contra partida, outros são contaminantes, como calcários e minerais de baixa resistência mecânica.

3.5.4 Estimativa do teor de pasta de cimento

Para determinar o teor de aglomerantes, ou seja, a quantidade de pasta de cimento ainda presente nos agregados reciclados, utiliza-se o método de reconstituição de traço, adaptado por Quarcioni (Quarcioni, Chotoli and Aleixo 2003). O método consiste em lixiviar a amostra com uma solução de ácido clorídrico (HCl) concentrado em 33%.

O ácido tem o poder de separar argilominerais, quartzo e feldspatos (insolúveis), dos aglomerantes solúveis (Quarcioni et al. 2003). Depois o material filtrado é seco a uma temperatura de 105°C para evaporar qualquer líquido presente e depois a amostra é calcinada a 1.000°C. O teor de aglomerantes é a porcentagem em massa perdida em relação à inicial após todo esse processo de lixiviação do ácido clorídrico.

Esse método é válido quando agregados ou rochas solúveis em ácido não estão presentes nesses agregados e areias, como, por exemplo, os de origem calcária. (Quarcioni et al. 2003).

3.5.5 Separações minerais

Os ensaios de separações minerais têm por objetivo separar as diferentes espécies minerais, baseados em uma ou mais propriedades físicas (densidade, cor, tamanho, susceptibilidade magnética, hidrofobicidade, etc.) que os diferenciam, pois possuem comportamentos diferenciados dependendo da condição imposta (Sant'Agostino e Kahn, 1997). Por exemplo, para separar um material pouco magnético de um altamente magnético (ferromagnético), basta aproximar um ímã que os produtos terão comportamentos diferenciados, o mais magnético será atraído para o ímã e o outro não.

Alguns procedimentos de separações minerais aplicáveis a caracterização de areias produzidas a partir de resíduos de construção e demolição são descritos a seguir:

Elutriação: O equipamento para este ensaio é um tubo cilíndrico transparente em que o material é alimentado na parte superior e em queda se separa com um fluxo de água ascendente e constante (Figura 3) que promove a separação das partículas de acordo com seus comportamentos hidrodinâmicos (Sampaio e Tavares 2005).

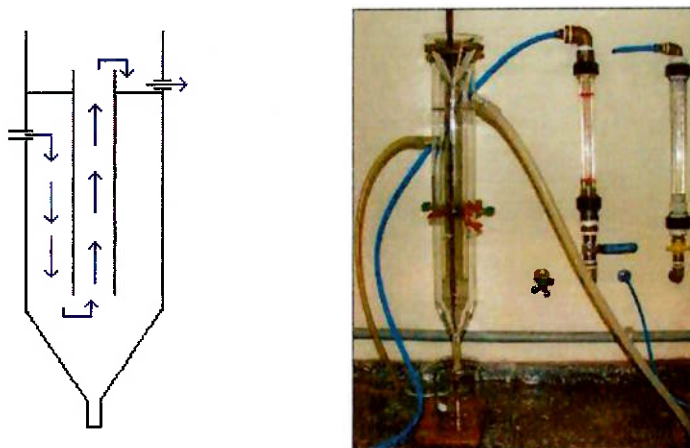


Figura 3 – Esquema de um elutriador e elutriador usado

O elutriador é usado para gerar dois produtos, o afundado e o flutuado, mas pode ser usado para gerar mais de dois produtos. Controlando a vazão de água pode-se gerar produtos mais densos com vazões de água maiores (Kelly e Spottiswood 1982).

Este ensaio é o mais simples dos ensaios convencionais do tipo afunda-flutua (Sampaio e Tavares 2005), no qual a separação é baseada na velocidade de fluidização das partículas. Como o intuito é separar por densidade, o tamanho das partículas ensaiadas deve ser controlado, para isso a amostra ensaiada deve ser previamente peneirada em intervalos estreitos. Desta forma, partículas com menor velocidade (menos densas ou placoídes) acompanharão o fluxo de água, saindo pela parte superior do equipamento; para este produto é denominado "overflow", flutuado ou leve. As outras partículas com maior velocidade de fluidização não acompanharão o fluxo ascendente de água e se sedimentarão no fundo do equipamento; para este produto é denominado "underflow", afundado ou pesado.

Separação magnética: um dos principais equipamentos utilizados na avaliação da separação mineral por susceptibilidade magnética é o separador do tipo Frantz, pois se trata de um equipamento com desempenho otimizado (Sant'Agostinho e Kahn, 1997).

O material seco é alimentado aos poucos e submetido a um campo magnético com intensidade variável. Desta forma materiais magnéticos na intensidade de campo ensaiada são destinados para uma calha onde são recolhidos, e o produto não magnéticos para outra. Os separadores Frantz estão disponíveis em duas configurações: isodinâmico e de barreiras (Figura 4).

O Frantz isodinâmico mantém a força magnética sobre as partículas constante ao longo de toda a zona de separação. Apesar de sua elevada eficiência de separação, opera com pequena taxa de alimentação, sendo ideal para amostras com até 50 gramas (Sant'Agostinho e Kahn, 1997).

O Frantz de barreiras proporciona uma separação em faixas de susceptibilidade mais amplas e uma maior capacidade de alimentação, por apresentar um arranjo diferente de geração de campo, possibilitando maior gradiente de campo.

A separação de agregados reciclados em Frantz foi avaliada por Xing (Xing et al. 2004). Na oportunidade foram usadas amostras com materiais cimentício e cerâmico em diferentes proporções; os resultados mostram uma elevada eficiência nesta separação (cerâmica-cimento).



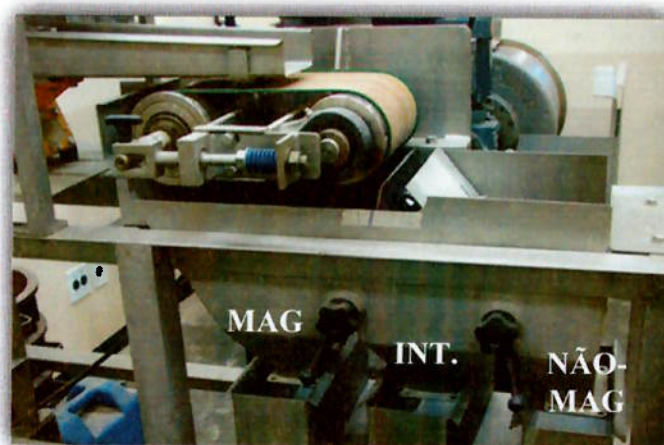
(a) Frantz isodinâmico



(a) Frantz de barreiras

Figura 4 – Separadores eletromagnéticos Frantz

Outro separador magnético de elevada eficiência e utilizado industrialmente é o rolo de terras raras (ou Re-roll, Figura 5).

**Figura 5 - Separador magnético de rolo de terras raras**

O material alimentado cai em uma correia que passa por um tambor, que contém ímãs de terras raras interiores. Pode-se controlar sua rotação e, conseqüentemente, a velocidade da esteira, desta forma o material que não é magnético é lançado a uma distância maior enquanto que o mais magnético fica preso na esteira. A rotação do tambor associada à vazão de alimentação produz um leque de material que pode ser separado em vários produtos (Wills e Napier-Munn 2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Amostra

A amostras utilizadas para os estudos de separabilidade são provenientes da usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição Urbem Tecnologia Ambiental, localizada na região do ABC da região metropolitana de São Paulo.

A amostragem primária (realizada na usina) bem como a produção de areia reciclada a partir de RCD são descritas no trabalho de Ulsen e colaboradores (Ulsen et al. 2010). A amostragem para o presente estudo foi realizada no produto de britagem terciária por VSI geradas nos estudos de processamento mencionados.

Um fluxograma apresentando a origem das amostras e o ponto de coleta de amostras para os estudos de separabilidade é apresentado na Figura 6. Para manter a representatividade da amostra inicial a primeira amostra tomada para os ensaios de separabilidade tinha cerca de 300 quilos, os quais foram usados para os ensaios.

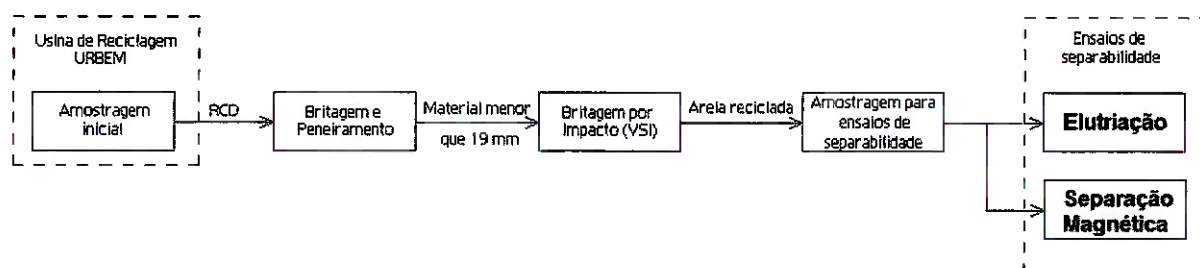


Figura 6 – Fluxograma da origem do material

4.2 Elutriação

A preparação das amostras para os ensaios de elutriação foi realizada por a úmido em malhas de aberturas nominais de: 2,0; 1,2; 1,0; 0,84; 0,60; 0,42; 0,30; 0,21; 0,15; 0,074 mm. Foram escolhidas diversas malhas para se obter frações com intervalos estreitos de granulometria para que o tamanho da partícula tivesse a menor interferência possível na separação.

As separações no elutriador foram realizadas com fluxos de água foi determinados de forma que cerca de 20% do material fosse leve e 80% pesado, para que a separação fosse eficiente na concentração das fases com menor proporção de pasta de cimento aderida. Para tanto, foram utilizadas vazões diferente para cada fração granulométrica, devido velocidades de queda diferentes. A vazão de água foi controlada por rotâmetros.

O funcionamento do equipamento utilizado e a determinação das curvas de correlação entre o tamanho da partícula, a densidade desejada na separação e a vazão de água necessária para a separação foi anteriormente estudada por Higa (Higa, 2009).

O procedimento do ensaio consiste em alimentar a amostra de forma cautelosa e constante na forma de polpa para que as partículas se dispersem aleatoriamente, sem arraste ou o mínimo possível. O material flutuado era conduzido por canos de borracha para baldes, onde seria desaguado a água excedente e o afundado se concentrou no fundo do aparelho, que era removido ao termino do ensaio.

4.2.1 Caracterização dos produtos da elutriação

Os produtos dos diferentes ensaios de elutriação foram analisados segundo os balanços de massa dos ensaios, que foi feito com base na distribuição em massa dos produtos; a composição química por fluorescência de raios X) a partir de análises de amostras fundidas; análise da quantidade de pasta de cimento por ataque ácido por HCl; avaliação da composição mineralógica por difratometria de raios X; e observações em microscopia óptica.

4.3 Estudo de separabilidade em Frantz de barreiras

As amostras usadas na separação magnética em Frantz de barreiras foram peneiradas a úmido nas seguintes malhas: 2,0; 1,2; 0,60; 0,30; 0,15; 0,074 mm, obtendo seis frações para o ensaio (até +0,074mm), já que a fração menor que 0,074 mm não foi estudada por ser muito fina para o equipamento.

A configuração do equipamento foi: inclinação de alimentação de 18°, inclinação da calha lateral de 15° e intensidades de campo variáveis entre 0 e 0,6 A.

4.4 Estudo de separabilidade em rolos de terras raras (RE-roll)

Os ensaios realizados no separador Frantz mostraram resultados mais promissores para as frações menores que 1,2 mm de forma que os ensaios em RE-roll ficaram restritos a material inferior a 1,2 mm.

Os estudos foram realizados em duas condições:

- 1) *amostra tal qual*: seleção e amostragem das frações abaixo de 1,2 mm da amostra tal qual, sendo: -1,2+0,6; -1,2+0,15, -0,6+0,15 mm;
- 2) *produto de britagem <1,2mm*: britagem em rolos das frações acima de 1,2 mm em circuito fechado com peneira até que todo material fosse passante na mesma malha. Do produto britado seguiu-se peneiramento a úmido para obtenção do produto -1,2+0,15 mm.

Para o ensaio foi do RE-roll foi usado um alimentador vibratório com alimentação variável, com calha de 4 polegadas, rolo de 4 polegadas com rotação variável. O produto intermediário foi repassado nas mesmas condições que a amostra inicial, totalizando 5 produtos: Não magnético, Intermediário não magnético, Intermediário intermediário, Intermediário magnético (a soma dos intermediários é o misto da primeira passada) e Magnético. Como mostra a Figura 7.

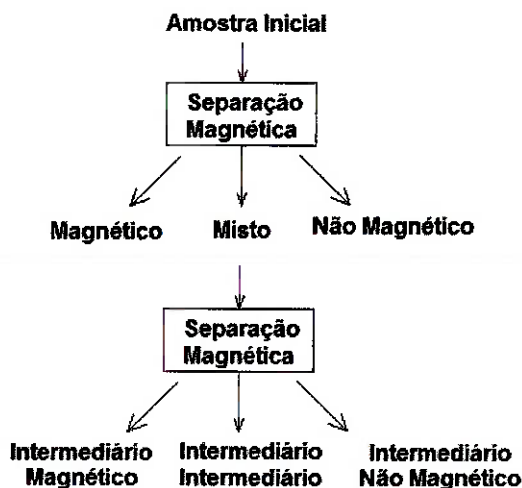


Figura 7 - Fluxograma no ensaio em RE-roll

4.4.1 Caracterização dos produtos da separação magnética

Para caracterizar os diversos produtos das separações magnéticas foram feitos balanços de massa dos ensaios, que foi feito com base na distribuição em massa dos produtos; a composição química por fluorescência de raios X a partir de amostras fundidas; composição mineralógica por difração de raios X e microscopia óptica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Material Inicial

A distribuição granulométrica e os teores dos principais elementos analisados da amostra inicial são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise granuloquímica da amostra inicial

Fração (mm)	Massa (%)	Teores (%)								1-RI	CaO + PF	Distribuição de teores (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	PF			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	PF
3,0 + 2,0	0,13	62,1	11,5	3,1	2,2	3,3	1,7	9,3	6,6	0,25	15,9	12,3	17,0	14,3	12,7	12,1
-2,0 + 1,2	0,14	65,6	10,4	3,0	1,9	3,0	1,4	8,8	6,1	0,25	14,9	13,8	16,3	14,4	12,8	12,0
-1,2 + 0,6	0,20	71,5	8,2	2,7	1,3	2,5	1,1	7,5	5,2	0,23	12,7	21,7	18,6	19,2	15,6	14,6
-0,6 + 0,3	0,15	75,8	6,6	2,4	0,9	2,1	1,0	6,7	4,8	0,21	11,5	17,4	11,3	12,4	10,5	10,1
-0,3 + 0,15	0,17	74,4	6,4	2,3	0,7	1,9	1,0	7,5	6,2	0,23	13,5	18,6	12,0	13,1	13,0	14,8
-0,15 + 0,074	0,09	64,0	8,5	3,2	0,9	2,3	1,6	11,1	7,9	0,32	19,0	8,3	8,2	9,5	9,9	10,0
-0,074	0,12	42,7	12,0	4,0	0,8	2,2	2,4	19,9	15,5	0,56	35,4	7,9	16,7	17,2	25,5	26,2
Total		66,4	8,9	2,9	1,3	2,5	1,4	9,6	7,1	0,28	16,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Pelos teores apresentados pode-se perceber que há três grupos. O primeiro grupo, os mais grossos, de -3,0 até 1,2 mm, apresenta teores de sílica por volta de 60%, contém elevados teores de Al₂O₃ e apresenta quantidade considerável de CaO mais perda ao fogo. O segundo grupo, representado pelas frações entre 1,2 e 0,074 mm, é o que possui maior teor de sílica, menores teores de CaO e perda ao fogo. E o terceiro, e último, grupo, referente a fração menor que 0,074 mm, com os menores teores de sílica, maiores teores de óxidos de alumínio e de CaO mais perda ao fogo; este último contém mais pasta de cimento e argilominerais que as outras frações dado que esta apresenta menores resistências a abrasão e compressão que os agregados.

5.2 Elutrição

As relações de vazão de água, tamanho de partícula e recuperação de leves está representado na Figura 8.

Pode-se perceber que existe uma relação entre vazão de fluido ascendente e o diâmetro médio de partículas, isso ocorre, pois como já discutido anteriormente partículas maiores tem maior velocidade terminal e para que ocorra a separação em torno de 20% de fluído necessita de maior vazão de fluído

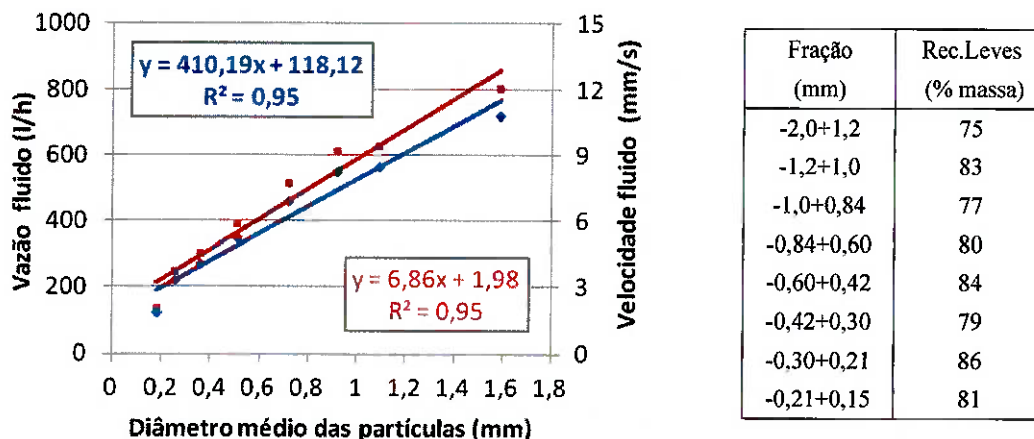


Figura 8 - Correlação entre a vazão de fluido e recuperação em massa no produto leve para cada intervalo granulométrico

Os produtos obtidos na elutriação foram analisados segundo seus balanços de massa, análise química, resíduos insolúveis, massa específica por picnometria, esses resultados estão na Tabela 2.

Como esperado os produtos afundados apresentam maior massa específica que os flutuados, sendo $2,60 \text{ g/cm}^3$ para os pesados e $2,43 \text{ g/cm}^3$ os leves. Os produtos leves apresentam sempre maior quantidade de CaO e perda ao fogo, confirmando a tendência de que os materiais que contem pasta de cimento são mais porosos e menos densos que as areias.

Os teores de CaO e perda ao fogo aumentam conforme menor a granulação do material, ou seja, nos produtos leves das frações mais finas há teores elevados de derivados de cimento, o inverso ocorre com as frações pesadas. Isso se deve ao fato que nas frações mais finas o material (pasta de cimento e areia) está mais liberado dos agregados reciclados.

O resultado final do ensaio mostrou que os produtos afundados apresentaram um teor de CaO mais perda ao fogo menor que os flutuados, sendo 9,7% e 21,7% respectivamente, o que mostra a existência de uma correlação entre a densidade do material e seu teor de CaO.

Os teores de sílica são mais elevados no produto pesado, com tendência a aumentar nas frações granulométricas mais finas. Por outro lado, os teores de alumina e ferro são menores nos produtos pesados e decrescentes para os finos; assim como os teores de MgO. O magnésio presente no produto leve está relacionado essencialmente aos minerais micáceos, enquanto que no produto pesado é proveniente da dolomita e, secundariamente, silicatos ferro-magnesianos. A presença de carbonatos (calcita e dolomita) nessas amostras foi confirmada por Ulsen (Ulsen et al. 2010).

O comportamento dos óxidos de alumínio e ferro ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) é o inverso do observado para a sílica, apresentando um teor mais elevado nas frações leves. Os teores de óxido de alumínio está relacionado com argilas e conseqüentemente com as cerâmicas, que apresentam uma menor densidade que as rochas. Já os teores de Fe_2O_3 podem ser explicados pelo comportamento de alguns minerais, como as micas, que por seu comportamento hidrodinâmico é carregado para o flutuado.

Tabela 2 – Composição dos produtos da elutriação

Fração Vel. (mm/s)	Produto elutriação	ME pic. água	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição ensaio (%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	PF	1-RU	CaO+PF	CaO+PF	SiO ₂	Al+Fe	Na+K	1-RU	
-2,0+1,2	Leve	2,48	25%	62,3	9,18	2,54	1,11	2,46	1,49	1,4	1,4	8,32	32,8	19,7	35%	23%	23%	19%	34%
12,0	Pesado	2,62	75%	68,3	9,88	2,67	2,02	2,99	1,21	6,99	4,83	20,8	11,8	11,8	85%	77%	77%	81%	66%
	Total	2,59	100%	66,8	9,71	2,64	1,80	2,86	1,28	8,08	5,69	23,8	13,8	13,8	100%	100%	100%	100%	100%
-1,2+1,0	Leve	2,46	17%	61,3	8,95	2,51	0,87	2,35	1,55	12,3	8,68	34,3	21,0	21,0	27%	15%	17%	13%	25%
9,4	Pesado	2,61	83%	70,1	9,04	2,39	1,74	2,74	1,08	6,64	5,13	21,9	11,8	11,8	73%	85%	83%	87%	75%
	Total	2,59	100%	68,6	9,03	2,41	1,59	2,67	1,16	7,62	5,74	24,0	13,4	13,4	100%	100%	100%	100%	100%
-1,0+0,84	Leve	2,47	23%	61,6	8,81	2,76	0,80	2,32	1,54	11,9	8,70	34,3	20,6	20,6	37%	20%	25%	19%	34%
9,2	Pesado	2,62	77%	73,5	8,00	2,29	1,49	2,49	0,93	5,86	4,27	19,2	10,1	10,1	83%	80%	75%	81%	66%
	Total	2,58	100%	70,8	8,18	2,39	1,34	2,45	1,07	7,22	5,28	22,7	12,5	12,5	100%	100%	100%	100%	100%
-0,84+0,60	Leve	2,53	20%	61,4	8,63	3,42	0,76	2,26	1,54	11,8	9,01	34,7	20,8	20,8	35%	17%	25%	18%	30%
7,7	Pesado	2,59	80%	75,9	7,17	1,88	1,27	2,23	0,81	5,46	4,23	20,0	9,69	9,69	65%	83%	75%	82%	70%
	Total	2,58	100%	73,0	7,46	2,19	1,17	2,24	0,96	6,73	5,19	23,0	11,9	11,9	100%	100%	100%	100%	100%
-0,60+0,42	Leve	2,35	18%	60,4	9,07	3,09	0,68	2,29	1,74	13,4	8,12	39,1	21,6	21,6	37%	14%	24%	18%	35%
5,9	Pesado	2,61	82%	78,8	5,97	2,42	1,02	1,95	0,69	4,71	3,16	15,7	7,87	7,87	83%	86%	76%	92%	85%
	Total	2,56	100%	75,5	6,52	2,54	0,96	2,01	0,88	6,27	4,05	19,9	10,3	10,3	100%	100%	100%	100%	100%
-0,42+0,30	Leve	2,36	18%	58,4	9,07	3,05	0,66	2,23	1,95	14,6	8,59	41,8	23,2	23,2	39%	13%	25%	18%	36%
4,5	Pesado	2,60	82%	79,8	5,62	2,27	0,90	1,86	0,68	4,73	3,07	15,6	7,80	7,80	61%	87%	75%	82%	64%
	Total	2,55	100%	76,0	6,23	2,41	0,86	1,92	0,90	6,46	4,04	20,2	10,5	10,5	100%	100%	100%	100%	100%
-0,30+0,21	Leve	2,38	21%	64,5	8,11	2,65	0,71	2,07	1,53	11,6	7,49	35,2	19,1	19,1	35%	18%	25%	22%	33%
3,7	Pesado	2,59	79%	77,1	5,95	2,56	0,80	1,83	0,81	5,93	3,85	19,2	9,78	9,78	85%	82%	75%	78%	87%
	Total	2,55	100%	74,5	6,41	2,58	0,78	1,88	0,96	7,13	4,62	22,6	11,8	11,8	100%	100%	100%	100%	100%
-0,21+0,15	Leve	2,39	19%	51,6	9,65	3,48	0,62	2,13	2,39	17,7	11,5	50,4	29,2	29,2	42%	14%	27%	20%	39%
2,0	Pesado	2,59	81%	77,4	5,64	2,95	0,80	1,76	0,79	5,50	3,95	19,0	9,45	9,45	58%	86%	73%	80%	61%
	Total	2,55	100%	72,4	6,41	3,05	0,76	1,83	1,10	7,84	5,41	25,0	13,2	13,2	100%	100%	100%	100%	100%
Total	Leve	2,43	20%	60,4	8,92	2,96	0,78	2,27	1,70	12,9	8,71	37,6	21,7	21,7	36%	17%	24%	19%	34%
-2,0+0,15	Pesado	2,60	80%	75,3	7,11	2,41	1,25	2,22	0,87	5,68	4,00	18,8	9,68	9,68	64%	83%	76%	81%	66%
	Total	2,57	100%	72,4	7,45	2,51	1,15	2,22	1,03	7,11	4,94	22,5	12,1	12,1	100%	100%	100%	100%	100%
	Total dosado	2,58		71,9	7,83	2,58	1,20	2,35	1,12	7,59	5,50	23,0	13,1	13,1					

Para o estudo das diferentes fases minerais nos produtos foram feitos difratogramas comparativos (Figura 9) de três frações (-2,0+1,2; -0,84+0,60; -0,21+0,15 mm) e a estimativa das quantidades de fases minerais está na Tabela 3.

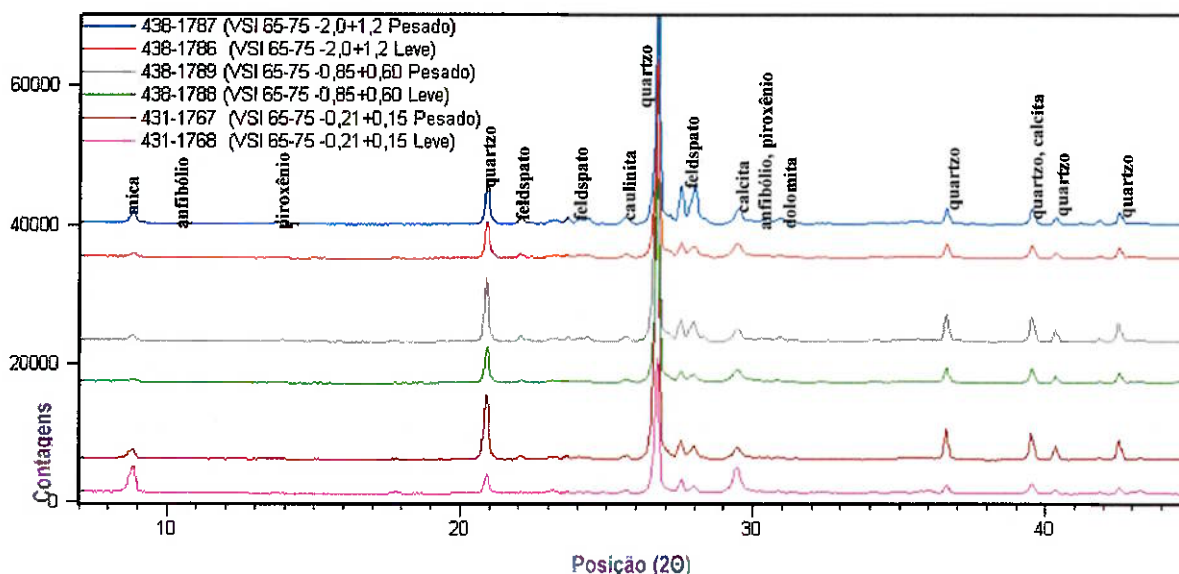


Figura 9 - Difratogramas comparativos dos produtos da elutriação de três frações

Tabela 3 - Estimativa da composição mineralógica de produtos selecionados da elutriação

Fração (mm)	Minerais (%)						
	feldspato	quartzo	mica	argilomin.	calcita	dolomita	min. pesados
-2,0+1,2							
Leve	45	21	14	4	11	5	
Pesado	53	20	4	1	8	5	9
-0,84+0,60							
Leve	44	23	18		12	3	
Pesado	38	35	6		8	4	9
-0,21+0,15							
Leve	35	17	14	7	23	4	
Pesado	33	47	3		9	4	6

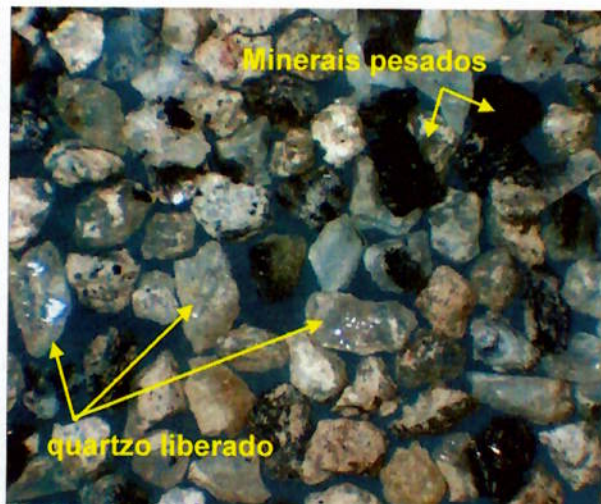
Os produtos derivados da britagem de rochas (feldspatos, micas, quartzo e minerais pesados) são encontrados majoritariamente nos produtos pesados, com exceção das micas, pois apresentam um comportamento hidrodinâmico diferenciado devido seu hábito placóide.

Nos produtos leves a fase identificada como calcita está essencialmente relacionada à pasta de cimento aderida, sendo expressiva a proporção desta fase no produto leve das frações mais finas (liberação).

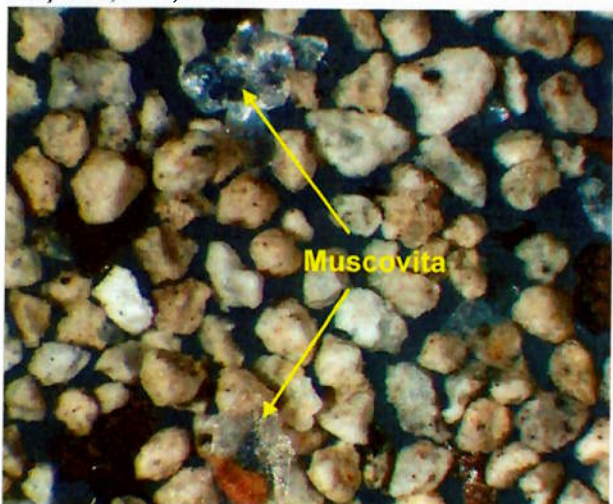
Fotomicrografias dos produtos das diferentes frações, que estão representadas na Figura 10, que ilustram a maior quantidade de pasta de cimento nos produtos leves e a maior liberação da pasta de cimento das partículas de areia nos produtos mais finos.



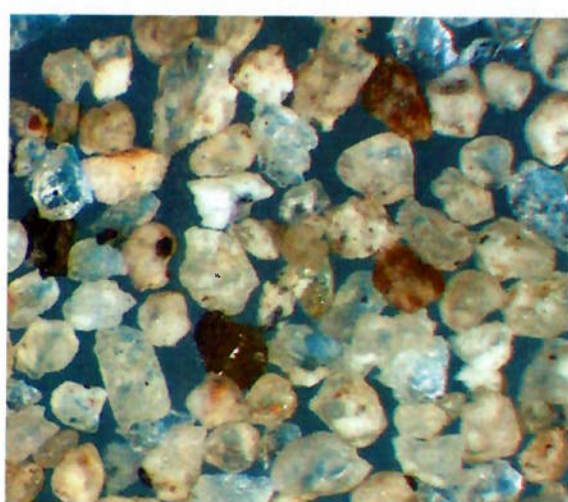
Fração -1,0+0,84 mm



Fração -0,84+0,60 mm



Fração -0,21+0,15 mm



LEVE ELUTRIAÇÃO

PESADO ELUTRIAÇÃO

Figura 10 - Imagens de produtos leve e pesado da elutriação; fração entre 1,0 e a,15 mm

Com as imagens fica claro, que o produto pesado apresentam menos pasta de cimento que os produtos leves. Também fica evidente o fato de que nas frações mais finas há um aumento significativo da liberação da pasta de cimento aderida à superfície das partículas. A marcante presença de fragmentos de rocha antes observada no produto pesado é substituída pelo aumento na quantidade de partículas de quartzo liberadas. Outro fato que pode ser observado é a presença da mica no produto flutuado.

5.3 Separação no Frantz

O separador magnético se mostrou muito eficiente como o esperado; antes mesmo da análise química já era possível notar visualmente um separação satisfatória; os resultados de balanço de massa estão representados Gráfico 1.

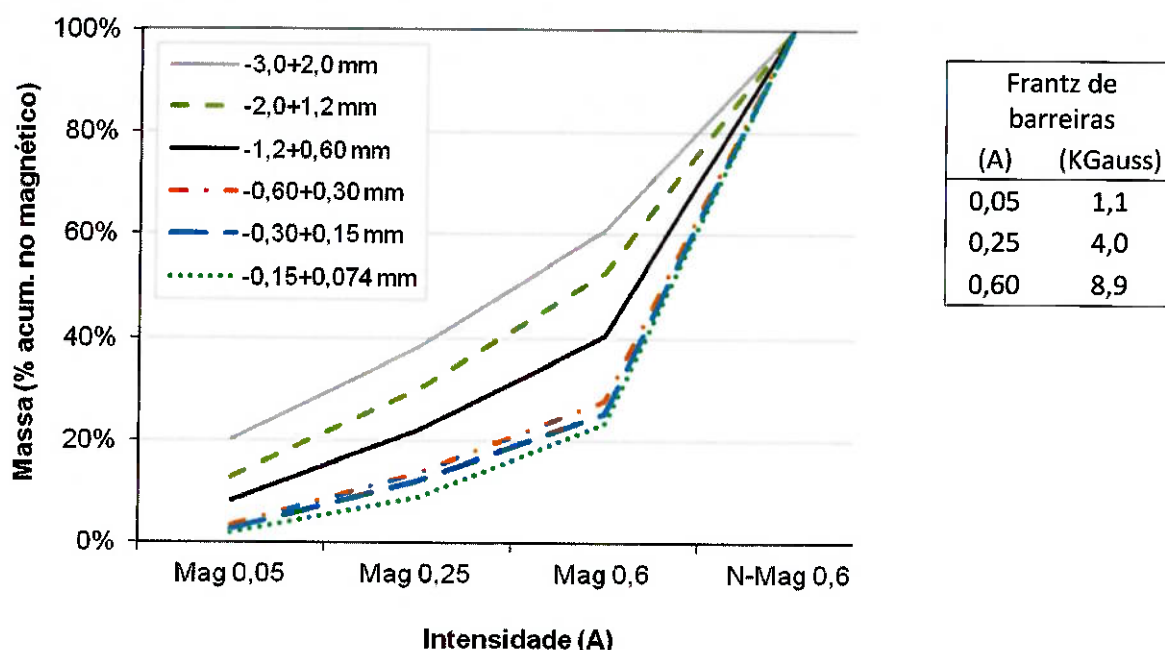


Gráfico 1 - Curvas de separabilidade magnética por fração granulométrica

Como pode-se observar nas curvas de separabilidade a quantidade de material não magnético é inversamente proporcional com o tamanho da partícula analisada, variando de 39% para a fração mais grossa (-3,0+2,0 mm) para 75% para a fração mais fina (-0,30+0,15 mm). Isso também é outro indicativo que a liberação é maior para partículas mais finas.

Os balanços de massa, os teores e distribuições dos principais óxidos são sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Teores e distribuição dos principais óxidos e massa nos produtos da separação magnética

Fração (mm) / Produto	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição ensaio (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	PF	CaO+PF	CaO+PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
-3,0+2,0	Mag 0,05	20%	61,8	14,7	5,32	3,49	4,06	1,50	5,01	2,03	7,04	8,2	20,6	28,2	34,5	36,5	27,2
	Mag 0,25	18%	61,8	10,7	3,10	2,05	2,89	1,43	10,9	5,13	16,0	16,7	18,3	18,2	17,9	19,0	17,2
	Mag 0,6	23%	58,8	10,9	3,62	1,57	2,82	1,73	11,6	6,69	18,3	24,0	22,0	23,4	26,3	18,4	21,1
	N-Mag 0,6	39%	60,3	8,10	1,69	1,28	2,64	1,63	12,8	9,63	22,4	51,0	39,1	30,2	21,3	26,1	34,4
-2,0+1,2	Mag 0,05	13%	61,0	14,0	6,49	3,20	3,62	1,58	5,83	2,17	8,00	6,9	12,3	18,6	22,6	22,8	16,4
	Mag 0,25	17%	60,6	10,7	4,96	2,09	2,79	1,32	9,60	5,58	15,2	17,6	16,4	19,1	23,2	20,0	16,9
	Mag 0,6	23%	58,4	11,0	5,45	1,54	2,74	1,57	10,0	7,16	17,2	26,2	20,8	25,7	33,4	19,3	21,7
	N-Mag 0,6	47%	68,4	7,50	1,64	1,45	2,73	1,07	8,73	6,79	15,5	49,2	50,5	36,6	20,8	37,8	45,0
-1,2+0,6	Mag 0,05	8%	58,4	12,3	7,86	2,64	3,22	1,68	7,39	3,92	11,3	7,6	6,8	13,0	18,3	17,3	11,2
	Mag 0,25	14%	59,1	9,26	5,04	1,27	2,35	1,76	12,1	6,25	18,4	20,7	11,6	16,4	19,7	14,0	13,7
	Mag 0,6	18%	60,9	11,4	4,11	1,41	2,73	1,48	9,98	6,20	16,2	24,4	16,0	27,0	21,4	20,7	21,3
	N-Mag 0,6	60%	77,3	5,66	2,40	1,01	2,13	0,59	5,66	4,02	9,68	47,3	65,6	43,5	40,6	48,1	53,8
-0,6+0,3	Mag 0,05	3%	54,8	10,5	10,5	1,84	2,59	2,11	10,2	4,69	14,9	4,4	2,6	5,8	10,9	7,2	4,6
	Mag 0,25	10%	55,8	9,50	7,39	0,91	2,46	2,38	13,3	6,49	19,8	17,3	7,9	15,5	22,8	10,5	13,0
	Mag 0,6	14%	57,4	11,1	5,36	1,13	2,36	1,71	12,2	6,74	19,0	22,4	11,0	24,6	22,4	17,7	17,0
	N-Mag 0,6	72%	79,6	4,72	2,03	0,80	1,76	0,49	5,32	3,83	9,15	56,0	78,6	54,1	43,9	64,6	65,3
-0,3+0,15	Mag 0,05	3%	46,4	7,86	16,7	1,00	1,63	2,09	13,4	7,47	20,8	4,1	1,7	3,2	14,8	3,4	2,2
	Mag 0,25	10%	47,9	10,7	8,94	0,65	2,66	3,33	14,4	8,39	22,8	16,7	6,4	16,0	29,7	8,1	13,6
	Mag 0,6	13%	50,3	11,3	4,12	0,83	2,02	2,14	16,9	10,4	27,2	27,2	9,2	23,2	18,7	14,2	14,1
	N-Mag 0,6	75%	80,1	4,96	1,44	0,76	1,78	0,45	5,30	3,91	9,21	52,1	82,8	57,6	36,9	74,3	70,1
-0,15+0,074	Mag 0,05	2%	29,9	7,16	33,1	0,64	1,15	2,16	14,4	7,43	21,8	2,3	0,9	1,6	21,2	1,4	1,0
	Mag 0,25	7%	39,1	12,4	11,2	0,55	2,99	4,29	16,2	9,18	25,4	9,7	4,3	10,1	25,5	4,2	9,1
	Mag 0,6	14%	39,0	13,3	6,44	0,60	2,33	3,45	20,5	12,1	32,6	25,4	8,8	22,1	30,0	9,4	14,4
	N-Mag 0,6	77%	71,1	7,42	0,94	1,02	2,28	0,95	8,92	6,04	15,0	62,5	85,9	66,1	23,4	85,0	75,6

Os produtos não-magnéticos, em todas as frações, apresentam os maiores teores de SiO₂ e Al₂O₃, que são os minerais de interesse. Outro ponto é a concentração elevada Fe₂O₃, Na₂O e K₂O, nos produtos não-magnéticos das frações intermediárias (-2,0 a +0,15 mm). A concentração de todos esses óxidos nos produtos são altamente positivas para os ensaios, pois estes estão relacionados diretamente com os agregados naturais.

Na Figura 11 estão expostos difratogramas comparativos dos produtos da fração granulométrica -2,0+1,2 mm.

Pode-se observar claramente que a quantidade de mica é maior em produtos magnéticos e que a quantidade de quartzo é relativamente maior nos produtos não-magnéticos para as duas frações. Na fração mais grossa o produto não-magnético tem teores menores de dolomita e calcita.

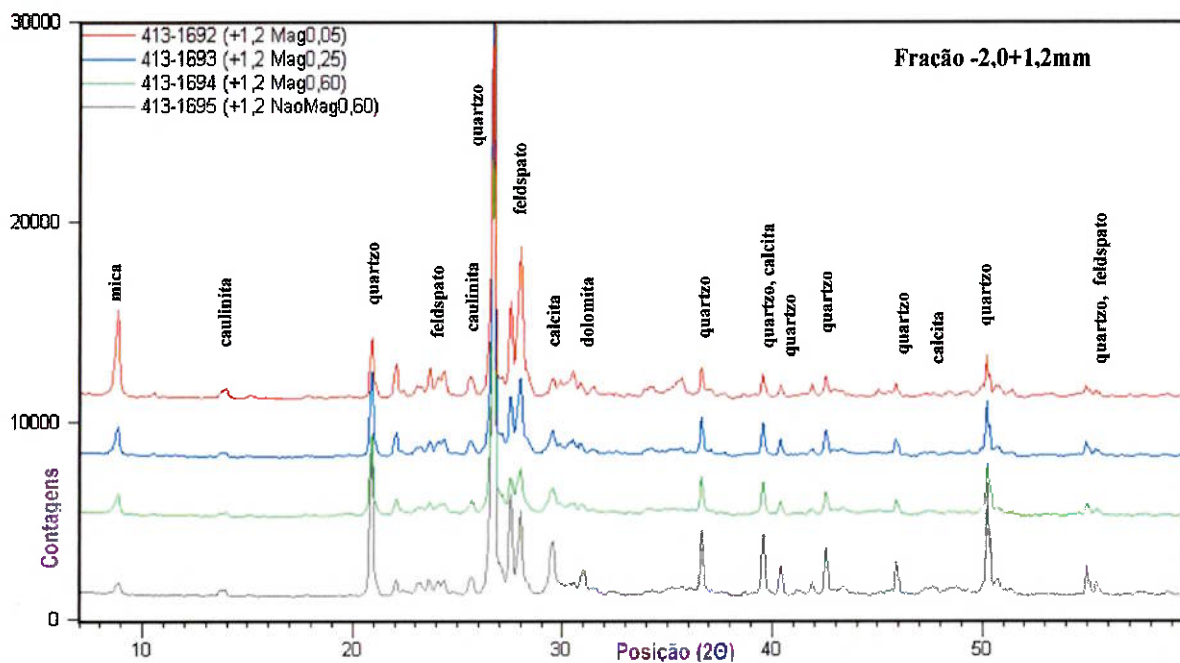


Figura 11 - Difratomogramas comparativos de produtos da separação magnética para a fração -2,0+1,2mm

Os diferentes produtos da separação magnética foram analisados ao microscópio estereoscópio. Na Figura 12 estão representados produtos da fração -1,2+0,6 mm e na Figura 13 os produtos da fração -0,3+0,15 mm.

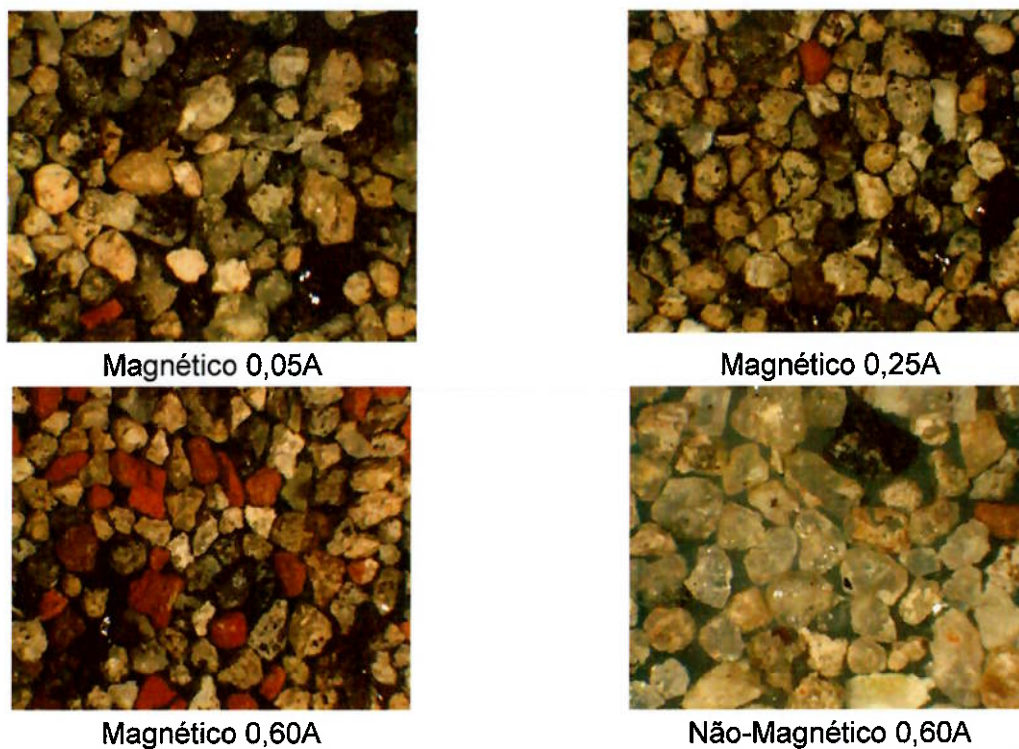


Figura 12 - Imagens de produtos de separação magnética em Frantz; fração -1,2+0,6 mm

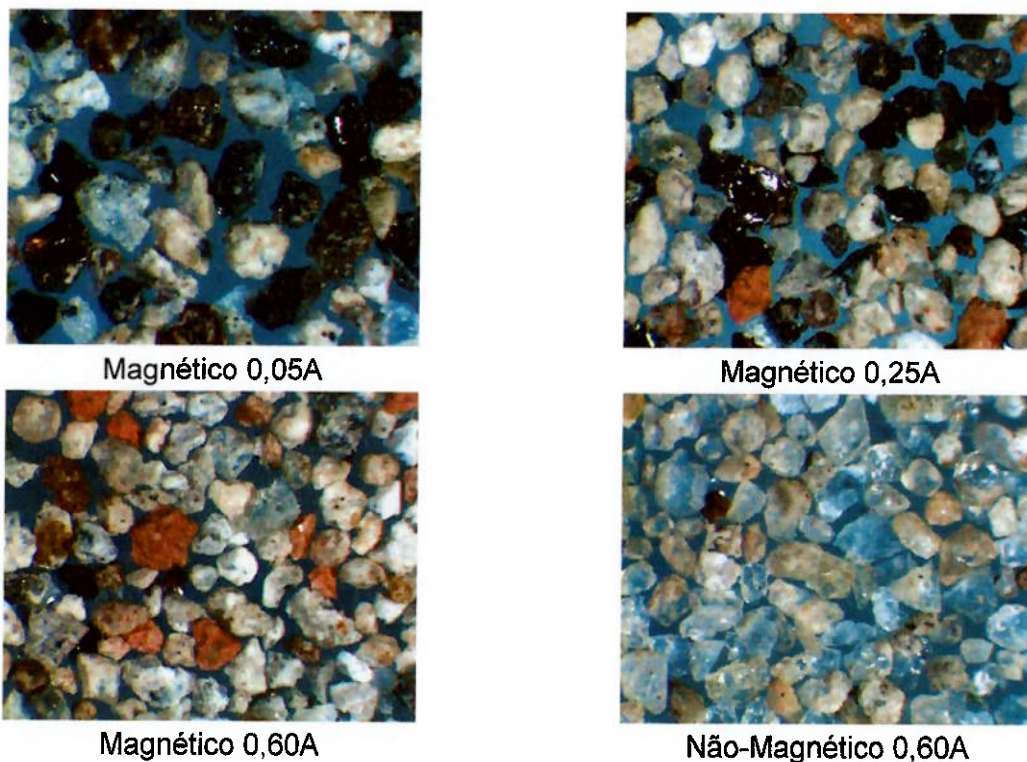


Figura 13 - Imagens de produtos de separação magnética em Frantz; fração -0,3+0,15 mm

Pode-se observar que para ambas as frações o produto não magnético é constituído por partículas mais liberadas da pasta de cimento e com maior presença de silicatos (como o quartzo). Outro fator relevante é a elevada quantidade de cerâmicas presentes no produto magnético na intensidade de 0,60 A.

Destaca-se também a elevada recuperação em massa no produto não magnético, de 60 a 80% de cada fração. Isso indica a possibilidade deste processo em garantir uma melhoria de qualidade com elevada recuperação. Esse produto (média de 70% em massa) teria uma aplicação mais nobre e, conseqüentemente, um maior valor agregado e o material magnético poderia ser empregado como materiais de construção ou outras aplicações que não demandam muita resistência mecânica nem tem implicações com a presença de micas e material cerâmico.

5.4 Separação magnética em equipamento RE-roll

Os ensaios realizados em RE-roll foram divididos em duas etapas, a primeira consistia em determinar parâmetro de produção, rotação e alimentação, e a segunda foi focada em como estes parâmetros atuavam sobre a amostra.

As amostras usadas no ensaio estavam todas com granulometria menor que 1,2 mm, porque pelo gráfico e dados do separador Frantz, pode-se perceber que frações maiores que esta apresentam menores recuperações em massa e menor teor. Isso se deve, possivelmente, ao fato de que partículas maiores que estas estarão menos liberadas da pasta de cimento.

5.4.1 Regulagem do equipamento

Primeiramente foram ensaiadas três amostras iniciais, preparadas por peneiramento à úmido, para determinar rotação e alimentação do equipamento. Quer-se a partição de

materiais (magnético e não magnético) equivalente a obtida dos estudos realizados no separador Frantz de barreiras.

As amostras analisadas e quantidade de material não magnético em Frantz eram as seguintes:

Amostra (fração)	Magnético (% massa)
-1,2 +0,15	68
-1,2 +0,60	60
-0,60 -0,15	73

Foi escolhida a amostra menor que 1,2 mm por causa de sua liberação, e foi observado no separador Frantz de barreiras que o comportamento magnético tem uma variação para as frações menores que 0,60 mm, por isso foram escolhidas essas três frações.

Para obter valores próximos aos dos ensaios obtidos no Frantz, foram variadas rotação e alimentação do equipamento. Os parâmetros avaliados e os balanços de massa obtidos estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetro e balanços de massa dos ensaios RE-roll

Fração	Parâmetros		Produtos				
	Rotação (rpm)	Alim. g/(pol.s)	Ñ MAG	INT/Ñ MAG	INT/INT	INT/MAG	MAG
-1,2 +0,15	100	1,58	59%	5%	5%	3%	27%
-1,2 +0,60	110	2,51	53%	5%	9%	3%	29%
-0,60 +0,15	115	3,45	69%	4%	3%	3%	21%

Cada parâmetro de produção, rotação e alimentação, encontrado na primeira etapa será uma condição de ensaio para a segunda etapa, totalizando em 3 condições diferentes: condição 1 - 100 rpm e 1,58 g/(pol.s); condição 2 - 110 rpm e 2,51 g/(pol.s); condição 3 - 115 rpm e 3,26 g/(pol.s).

Os resultados da análise química, Tabela 6, dos produtos comprovam que os materiais não magnéticos apresentam um teor menor de CaO (componente do cimento) e maior teor de sílica.

Tabela 6 – Teores de SiO e CaO nos diversos produtos do Re-roll

Fração (mm)	Teores de SiO ₂ e CaO (%)									
	Produto									
	Ñ MAG		INT/Ñ MAG		INT/INT		INT/MAG		MAG	
-1,2 +0,15	82,3	4,23	71,5	8,18	64,9	11,2	55,8	14,8	55,0	13,0
-1,2 +0,60	79,9	4,75	66,3	9,13	63,2	10,4	60,9	10,7	60,1	10,3
-0,60 +0,15	81,0	5,20	61,1	12,1	58,0	14,7	50,8	17,2	50,4	15,1

5.4.2 Produtos gerados

Após obter os parâmetros de operação do equipamento foram feitos novos ensaios com amostras iguais para as três condições para verificar qual seria a melhor condição para uma amostra integral. Para isso, foi peneirada grande quantidade de amostra na malha de 1,2 mm e

o material retido foi britado até que 100% fosse passante na malha, depois foi removido o fino (-0,15 mm). O balanço de massa do ensaio é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Balanços de massa dos ensaios de separação magnética

Condição	Parâmetros		Produtos				
	Rotação (rpm)	Alim. g/(pol.s)	Ñ MAG	INT/Ñ MAG	INT/INT	INT/MAG	MAG
1	100	1,58	48%	6%	16%	4%	27%
2	110	2,51	55%	5%	3%	10%	26%
3	115	3,45	59%	5%	8%	3%	25%

Devido a alta rotação dos tambores aliada a maior alimentação há maior probabilidade de arraste e maior lançamento do material, com isso há maior quantidade de material não magnético e menor de magnético na condição 3. Pelo mesmo motivo há maior quantidade de material intermediário (soma dos três intermediários) na condição 1.

Os resultados das análises químicas para as diferentes condições está na Tabela 8.

Tabela 8 - Teores e distribuição dos principais óxidos e massa nos produtos da separação magnética por RE-roll nas diferentes condições

Condição Produto	% em massa		Teores (%)								Distribuição ensaio (%)						
	ensaio	amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	PF	CaO + PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO + PF
Condição 1																	
MAG	26,7		56,2	11,8	5,4	1,7	2,8	2,1	11,5	6,8	18,3	21,4	36,9	64,2	32,1	30,8	36,7
INT / MAG	3,7		56,6	11,6	3,7	1,4	2,4	1,8	12,7	8,9	21,6	3,0	5,0	6,1	3,6	3,6	6,0
INT / INT	16,3		65,5	9,4	1,8	1,4	2,5	1,2	10,3	7,6	17,9	15,2	18,0	13,0	15,8	16,8	21,9
INT / Ñ MAG	5,7		71,6	8,1	1,4	1,6	2,5	0,8	7,3	6,1	13,4	5,9	5,5	3,5	6,3	5,9	5,7
Ñ MAG	47,6		80,1	6,2	0,6	1,3	2,2	0,6	4,6	3,7	8,3	54,5	34,6	13,3	42,2	42,9	29,7
Total ensaio	100%		70,0	8,5	2,3	1,4	2,4	1,2	7,8	5,5	13,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Condição 2																	
MAG	25,7		55,3	11,4	5,6	1,6	2,7	2,2	11,9	7,6	19,5	20,4	35,1	60,6	29,9	29,2	36,5
INT / MAG	9,7		55,7	11,4	3,9	1,3	2,3	1,8	13,2	9,2	22,4	7,8	13,3	16,1	9,4	9,5	15,9
INT / INT	3,5		62,2	10,1	2,1	1,4	2,5	1,4	11,6	8,5	20,1	3,1	4,2	3,1	3,6	3,6	5,1
INT / Ñ MAG	5,5		69,6	8,9	1,5	1,6	2,5	1,0	8,6	6,9	15,5	5,5	5,8	3,4	6,4	5,8	6,2
Ñ MAG	55,7		79,1	6,2	0,7	1,2	2,2	0,6	4,9	4,0	8,9	63,3	41,6	16,8	50,6	51,9	36,3
Total ensaio	100%		69,6	8,3	2,4	1,3	2,4	1,1	7,9	5,8	13,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Condição 3																	
MAG	24,6		54,8	11,5	5,8	1,6	2,7	2,2	12,2	7,7	20,0	19,0	34,3	62,0	28,7	28,0	36,3
INT / MAG	3,2		57,1	11,5	3,7	1,3	2,4	1,9	13,0	9,0	22,0	2,5	4,4	5,2	3,1	3,2	5,1
INT / INT	8,1		61,1	10,5	2,3	1,4	2,5	1,5	12,1	8,6	20,7	7,0	10,2	7,9	8,2	8,5	12,3
INT / Ñ MAG	5,4		68,0	9,0	1,7	1,5	2,5	1,0	9,0	6,8	15,8	5,2	5,9	4,0	6,1	5,7	6,4
Ñ MAG	58,8		80,0	6,3	0,8	1,2	2,2	0,6	5,0	4,2	9,2	66,3	45,1	20,9	53,9	54,6	39,9
Total ensaio	100%		70,9	8,3	2,3	1,4	2,4	1,1	7,8	5,7	13,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Da análise química pode-se perceber que mesmo variando a velocidade e alimentação os teores dos componentes de rochas (silicatos e óxidos de alumínio e ferro) são quase os mesmos nos produtos não magnéticos nas três condições. O mesmo ocorre para quase todos os outros elementos, salvo o teor de CaO mais perda ao fogo que aumenta conforme aumentou a rotação e alimentação.

A maior diferença observada é quanto a distribuição apresentada em cada ensaio, quanto maior a velocidade de rotação e alimentação maior foi a quantidade de material não magnético obtido. Isso se deve ao fato de que com a maior rotação acaba sendo lançado mais

material. Porém, isso ocorre para todas as fases minerais e por isso não é apresentado variações nos teores.

Como visto na análise químicas os teores das condições ficou muito semelhante, na Figura 14 estão representadas dois produtos: magnético e não magnético (os dois extremos). Foi escolhido uma só condição, pois todas apresentaram produtos semelhantes.



Figura 14 - Foto dos produtos Magnético e Não Magnético em RE-roll, 115 rpm, alimentação de 2,51 g/(pol.s) - Fração -1,2 +0,15 mm

Pode-se perceber que o produto magnético possui mais materiais escuros, que são os minerais máficos, algumas micas presentes nos agregados e partículas com grandes porções de pasta de cimento. Na porção mista do material há partículas que são compostas majoritariamente por cerâmicas e outras que contém elevada quantidade de pasta de cimento. Já os produtos não magnéticos apresentam agregados mais claros e liberados da pasta de cimento.

A separação no RE-roll se mostrou eficiente, como pode ser observado nas imagens o produto não magnético fica livre de boa parte da cerâmica, o intermediário contém quase toda a cerâmica e o magnético contém os minerais máficos, semelhante aos resultados obtidos no Frantz.

6 CONCLUSÕES

A separação promovida pelo elutriador se mostrou eficiente uma vez que os produtos afundados apresentaram maior densidade que o flutuado, além de diminuição de teores de CaO, PF e de aglomerantes nos materiais afundados. Sugere-se para estudos futuros, avaliar o comportamento do material quando ensaiado com intervalos granulométricos mais amplos.

O estudo de separação magnética feita em Frantz apresentou bons resultados, nas intensidades de campo magnético mais baixas foram retirados materiais com elevada quantidade de pasta de cimento, nas intensidades intermediárias há a presença de cerâmicas e partículas minerais não liberadas da pasta de cimento; e nos materiais não magnéticos a presença da pasta de cimento é pequena, apresentando minerais (principalmente quartzo) liberados.

A separação em RE-roll se mostrou muito promissora. Observações ao microscópio e as análises químicas comprovam o observado no Frantz. Materiais não magnéticos concentram grande parte da sílica e pouca pasta de cimento. Os resultados de análise química não mostraram elevada diferença nos produtos de distintas condições de rotação e alimentação, somente a distribuição em massa conforme já indicado nas separações em Frantz.

Uma comparação entre os resultados dos produtos finais obtidos para a elutriação e separação magnética em RE-roll são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação entre resultados de separabilidade por elutriação e separação magnética

Produto	% em massa	Teores (%)								Distribuição (%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO+ PF
Elutriação Pesado	80	75,3	7,1	2,4	1,3	2,2	0,9	5,7	4,0	83,2	76,2	76,5	64,0
Sep. magnética Não magnético	65	80,0	6,3	0,8	1,2	2,2	0,6	5,0	4,2	66,3	45,1	20,9	39,9

O produto da elutriação apresentou maior recuperação em massa que o da separação magnética e por isso a distribuição dos elementos de interesse e também de contaminantes é maior. Porém, o produto da separação magnética tem melhores teores nos elementos de interesse e no de contaminantes.

Então, se for o objetivo maior recuperação em massa o indicado seria optar pela elutriação, se o objetivo for a qualidade deve-se optar pela separação magnética. Outro fator importante para a tomada de decisão seriam os custos envolvidos que devem ser menores para a separação magnética. Embora haja um custo inicial mais elevado para a aquisição de equipamento, o custo de operação é menor por poder ser feito a seco. Sugere-se que seja estudado outras condições de separação magnética (equipamentos ou frações granulométricas) para melhorar a recuperação em massa, pois os resultados do Frantz de barreiras mostrou que em algumas frações pode-se chegar a mais de 75% de recuperação em massa com bons teores de elementos de interesse e contaminantes.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT. 1997. ABNT NBR NM ISO 3310-1:Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. ed. A.-A. B. d. N. Técnicas.
- . 2005. ABNT NBR 9935 - Agregados - Terminologia. ed. A.-A. B. d. N. Técnicas.
- Angulo, S. C. 2000. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. In *Escola Politécnica*, 155. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- . 2002a. *Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD*. In *Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, 293-307. São Paulo: IBRACON/IPEN.
- Angulo, S. C. & A. Mueller (2009) Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. *Materials and Structures*, 42, 739-748.
- ANGULO, S. C., C. ULSEN, F. M. R. S. LIMA, A. P. CHAVES & V. M. JOHN. 2009b. Processamento de resíduos de construção e demolição em usinas de reciclagem européias. In *Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção*. Porto Alegre.
- BIOCYCLE. 1996. *Initiating change in C&D management*, Emmaus. 44-48.
- Bish D.L. & Post J.E. (Eds) 1989. Modern powder diffraction. Mineralogical Society of America. Reviews in mineralogy, v. 20, 369 pp.
- Carneiro, A., J. Cassa, I. de Brum, A. Vieira, A. Costa, T. Sampaio & E. Alberte (2000) Construction waste characterisation for production of recycled aggregate--Salvador/Brazil. *Waste Management Series*, 1, 825-835.
- Coelho, J. M. 2001. The minning of aggregates in Metropolitan Region of São Paulo. In *Minning, Minerals and Sustainable development (MMSD) report*, 11. IIED/WBCSD.
- COMMISSION, E. 2000. Management of construction and demolition waste. <<http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment>>: DG ENV E.3.
- CONAMA. 2002. *Resolução no 307*. ed. M. d. C. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Secretaria Nacional da Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/02.
- Etxeberria, M., E. Vazquez & A. Mari (2006) Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58, 683-690.
- Etxeberria, M., E. Vazquez, A. Mari & M. Barra (2007) Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 735-742.

- Ferraz, G. R. 2001. *Estações de classificação e transbordo na cidade de São Paulo*. In *Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, 75-86. São Paulo: IBRACON/IPEN.
- Gress, D. L., M. B. Snyder & J. R. Sturtevant (2009) Performance of rigid pavements containing recycled concrete aggregates. *Transport Research Record*, 2113, 99-107.
- Higa, R. A. T. 2009. Concentração de minerais traços para mineralogia quantitativa. In *Escola Politécnica*, 28. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- HOBBS, G. & J. HURLEY. 2001. Deconstruction and reuse of construction materials. In *CIB Publication 266*, ed. A. R. CHINI, 98-124. Florida.
- John, V. M. 2000. *Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. In *Escola Politécnica*, 102. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- KAHN, H. PMI2612 - Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Mineraias I. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008. Material de aula.
- Kelly, E. C. & J. Spottiswood. 1982. *Introduction to mineral processing*. New York: John Willey.
- Lee, H., J. H. Kwon, K. H. Kim & H. C. Cho (2008) Application of DEM model to breakage and liberation behaviour of recycled aggregates from impact-breakage of concrete waste. *Minerals Engineering*, 21, 761-765.
- Minerals, M. 2005. Manual de Britagem. ed. M. Minerals.
- Nagataki, S., A. Gokce, T. Saeki & M. Hisada (2004) Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 34, 965-971.
- Pinto, T. P. 1999. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. In *Departamento de Engenharia de Construção Civil*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Quarcioni, V. A., F. F. Chotoli & D. M. Aleixo. 2003. *Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassas endurecidas*. In *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 647-662. São Paulo: ANTAC.
- RANGEL, A. S., E. M. M. Q. Farina, F. Garcia, M. C. Alves, C. M. S. Pessoa, G. Ferraz filho, G. M. Paula, J. B. M. Machado, L. Haguenaer, L. M. S. Servo & S. B. Holanda Filho. 1997. *Padrão de concorrência e competitividade da indústria de materiais de construção*. São Paulo: Singular.
- Sampaio, C. H. & L. M. M. Tavares. 2005. *Beneficiamento Gravimétrico*. Editora UFRGS.
- Sampaio, J. A., S. C. A. França & P. F. A. Braga. 2007. *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

- SANT'AGOSTINHO, L. M. & H. KAHN. 1997. Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Mineraias. In *Escola Politécnica*, 29. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- SCHNEIDER, D. M. 2003. Transporte de resíduos de construção e demolição na cidade de São Paulo. In *Faculdade de Saúde Pública*, 103. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- SCHULTMANN, F. & O. RENTZ. 2000. The state of deconstruction in Germany. In *CIB Publication 252*, eds. C. J. KIBERT & A. R. CHINI, 45-69. Florida.
- Ulsen, C., G. Hawlitschek, H. Kahn, S. C. Angulo & V. M. John. 2010. Recycled sand from brazilian construction and demolition waste. In *ICSU (in press)*, 11. Hong Kong.
- ULSEN, C., G. HAWLITSCHKEK, H. KAHN, S. C. ANGULO & V. M. JOHN. 2010a. Technological Characterization of Fine Fraction from C&D Waste. In *Progress of Recycling in the Built Environment*, 11. São Paulo: *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (no prelo)*.
- ULSEN, C., H. KAHN, S. ANGULO, V. M. JOHN & G. HAWLITSCHKEK. 2010b. Technological Characterization of Recycled Sand from C&D Waste (in press). In *International RILEM*. São Paulo: RILEM.
- WHITAKER, W. 2001. Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil. In *Escola Politécnica*, 153. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Wills, B. A. & T. J. Napier-Munn. 2006. *Wills' Mineral Processing Technology*. oxford.
- Wilson, J. 1996. Recycling construction and demolition waste. The dutch experience. In *Quarry Management*, 28-37.
- Xing, W. H., A. Fraaij, H. Pietersen, P. Rem & K. Van Dijk (2004) The quality improvement of stony construction and demolition waste (CDW). *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 19, 78-+.
- Zordan, S. E. 1997. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. In *Faculdade de Engenharia Civil*, 140. Campinas: Universidade de Campinas.