CARINA ULSEN

**CARACTERIZAÇÃO E SEPARABILIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS
PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

São Paulo
2011

CARINA ULSEN

**CARACTERIZAÇÃO E SEPARABILIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS
PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

Co-orientador:
Prof. Dr. Eldon Azevedo Masini

São Paulo
2011

CARINA ULSEN

**CARACTERIZAÇÃO E SEPARABILIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS
PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

Co-orientador:
Prof. Dr. Eldon Azevedo Masini

São Paulo
2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 10 de outubro de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Ulsen, Carina

Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição / C. Ulsen. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.

222 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Agregados miúdos reciclados 2. Resíduos de Construção 3. Caracterização Tecnológica 4. Separabilidade I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

DEDICATÓRIA

Aos grandes mestres de minha vida.

Aos educadores que têm a maior das missões.

AGRADECIMENTOS

"Gracias a la Vida que me ha dado tanto me dio dos luceros que cuando los abro perfecto distingo lo negro del blanco y en el alto cielo su fondo estrellado y en las multitudes el hombre que yo amo.

Gracias a la Vida que me ha dado tanto me ha dado la marcha de mis pies cansados con ellos anduve ciudades y charcos, playas y desiertos montañas y llanos y la casa tuya, tu calle y tu patio.

Gracias a la Vida que me ha dado tanto me ha dado la risa y me ha dado el llanto, así yo distingo dicha de quebranto los dos materiales que forman mi canto y el canto de ustedes que es el mismo canto y el canto de todos que es mi propio canto."

Gracias a la Vida que me ha dado tanto me ha dado el sonido y el abecedario con él las palabras que pienso y declaro madre amigo hermano y luz alumbrando, la ruta del alma del que estoy amando.

Gracias a la Vida que me ha dado tanto me dio el corazón que agita su marco cuando miro el fruto del cerebro humano, cuando miro al bueno tan lejos del malo, cuando miro al fondo de tus ojos claros.

Violeta Parra

Aqui as palavras sobram - não traduzem!

Á vida pelas oportunidades, pelas dificuldades, pelas pessoas que me causam torpor e que são meus maiores mestres, às situações que me fogem ao controle o tempo todo e me ajudam a "let it be". Aceitação, o caminho de uma vida.

Aos meus pais e avós por acreditarem que a educação move o mundo e me criarem dentro desta concepção. À minha apoiadora família, sempre na torcida, amor puro, simplesmente amor. IMPOSSÍVEL traduzir em palavras o que vocês significam.

Ao meu primeiro técnico de voleibol, Marquinhos, que me mostrou desde cedo o valor da disciplina; o verdadeiro professor que sempre citava grandes exemplos a serem seguidos.

Rich Jones, pela inspiração de sempre na alegria de viver.

Ao meu admirado orientador, por sua convicção da arte do ensinar, por nunca deixar seus alunos desamparados, por sua vitalidade no trabalho, pela sua incansável busca pela perfeição e por me permitir aprender a cada dia.

Aos docentes colaboradores de meu projeto de pesquisa e de vida: Eldon, Henrique, Vanderley e Sérgio, pelas críticas e debates constantes e pela crença em mim enquanto pesquisadora.

Aos meus mais fiéis alunos e apoiadores: Gustav (meu braço esquerdo - sou canhota!), Rafael (raça), Renato Nunes (doçura), Renato Iwamoto (questionamento), Renato Higa (todos os

predicados juntos), Ester Tseng (perfeccionismo), Lucia Higa (otimismo), Igor (novidade), Adriana (capricho, fofíssima!), Renato Contessotto (minha réplica mais fiel).

Às minhas queridas Cristina Bonézio e Cristina Borda e ao meu irmão Pepe pela leitura atenta do texto. As meninas da pós-graduação da Poli, Cristina, Eliane e Fátima pela doçura e simpatia de sempre.

A cada um do LCT, técnico ou pesquisador - todos! que fazem desse lugar tão especial... graças a vocês, aqui me sinto verdadeiramente em casa.

Aos meus parceiros e colaboradores, em especial à equipe do CTP da Metso e ao Gilson, da Akaflex, pelo apoio a este trabalho, que é mais que um objeto de pesquisa, é um objetivo de vida.

Aos meus amigos de longas reflexões: Ivan, Alê, Pipo, João Hammer, Ju Bixete, Vivi, Vicente.

Ai ai ai ... à grande paixão de minha vida: o vôlei e as voleibolistas :-)

Ao leitor,

Diz-se por aí que nossas teses nunca ficam do modo como gostaríamos, e isso quase sempre é uma verdade. Acho que no fundo temos uma expectativa muito grande quando fazemos uma tese, de acreditar que publicaremos dados incontestáveis ou que resolveríamos os problemas de determinado assunto. Era esse meu objetivo...demorei a entender que a tese é o começo de uma jornada que pode nunca terminar, porque a pesquisa em si nunca tem fim.

Chego ao final deste trabalho com a sensação de que tão pouco eu sei, não só dos agregados, mas da ciência em si, e da vida!

Mas eu aproveitei este trabalho, cada linha escrita foi pensada e repensada, cada figura editada cuidadosamente porque gostaria de compartilhar com vocês, leitores, o prazer que este trabalho me deu, e desejo que agradem também a vocês.

Leiam esse documento com critério, nenhum trabalho é a prova de erros... mesmo depois de tantas revisões e da leitura atenta de meus orientadores e dos membros da banca examinadora.

Enjoy!

EPÍGRAFE

"where there is a will, there is a way"

RESUMO

A demanda atual pela utilização de materiais reciclados na construção deve-se ao aumento crescente do consumo de agregados, à exaustão de jazidas próximas aos grandes centros e à proibição de deposição de resíduos inertes em aterros sanitários. Paralelamente, com o crescimento evidente do setor da construção em muitos países, o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) tornou-se uma questão econômica e ambiental prioritária.

Para a sustentabilidade do meio ambiente construído é imprescindível o desenvolvimento de novas aplicações para o agregado reciclado visando a ampliação das taxas de reciclagem. No entanto, a situação da fração areia de RCD é crítica, pois apesar de representar de 40 a 60% em massa do resíduo, é descartada como resíduo da própria reciclagem ou utilizada em aplicações de baixo valor agregado.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho consiste em estudar alternativas para a produção de areia reciclada a partir do processamento integral de resíduos de construções e demolições da região metropolitana de São Paulo, em uma abordagem inédita mundialmente. O estudo realizado pode ser subdividido em quatro etapas principais: a) amostragem; b) produção de areia a partir dos resíduos amostrados; c) estudos de separabilidade da areia reciclada; d) caracterização tecnológica dos produtos gerados como ferramenta de controle de qualidade de eficiência dos processos.

Os resultados demonstraram que o processamento integral de RCD por britagem terciária em impactador de eixo vertical é determinante na cominuição seletiva das fases porosas e na liberação entre a pasta de cimento e as fases minerais. O produto gerado apresentou menor conteúdo de pasta de cimento, partículas mais esféricas e reduzida porosidade. Adicionalmente demonstrou-se a separabilidade densitária e magnética entre as fases minerais dos agregados e a pasta de cimento. Dentre os procedimentos de caracterização destaca-se o desenvolvimento de uma metodologia para definição das associações das fases presentes, particularmente da individualização da pasta de cimento e carbonatos.

ABSTRACT

The current demand for recycling on construction is due to the increasing consumption of aggregates, the exhaustion of deposits close to large cities as well as the ban on inert materials dumping in landfills and the rising cost of its disposal. Moreover, with the remarkable increasing on construction activities in many countries, the management of Construction and Demolition Waste (CDW) became an economical and environmental priority issue.

To the sustainability of the built environment, the development of new applications for recycled aggregates and the increase of recycling rates are vital. However, the situation of the sand fraction of CDW is critical; although it accounts for 40 to 60% by weight of the waste, it is disregarded as waste recycling material or used in applications with low added-value.

In this context, the present research explores the potential of mineral processing technologies to produce recycled sand by total comminution of the CDW on sand fractions in an unprecedented approach worldwide. The improvement on recycled sand quality is crucial for the enlargement of recycling rates. The study may be described in four main steps: a) sampling of construction and demolition waste from Sao Paulo metropolitan area, Brazil; b) production of recycled sand from the sampled waste; c) separability studies of the recycled sand; d) technological characterization of the attained products to evaluate the processing efficiency.

The results demonstrated that the processing of the whole waste by tertiary crushing is fundamental to the selective comminution of porous phases and to the separation of cement paste from mineral phases. The attained product exhibited reduced content of cement paste, particles with higher sphericity and lower porosity. Additionally, it was demonstrated that the separability of aggregates from cement paste is feasible by density and magnetic separation. Regarding the characterization procedures, the development of an innovative method for a precise evaluation of the content of cement paste and phases associations, must be highlighted, especially on the measurement of cement paste and carbonates separately.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	19
LISTA DE FIGURAS	22
LISTA DE TABELAS	25
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	3
1.2 INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E JUSTIFICATIVAS	5
1.3 ESTRUTURA DA TESE	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	9
2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E RECICLAGEM	10
2.3 PROCESSOS DE RECICLAGEM E APLICAÇÕES DE AGREGADOS RECICLADOS.....	13
2.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS RECICLADOS.....	19
2.4.1 <i>Distribuição granulométrica</i>	21
2.4.2 <i>Morfologia de partículas</i>	23
2.4.3 <i>Composição química e mineralógica</i>	25
2.4.4 <i>Teor de pasta de cimento</i>	27
2.4.5 <i>Absorção de água e porosidade</i>	28
2.4.6 <i>Caracterização das associações das fases e separabilidade</i>	31
2.5 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS APLICADAS À RECICLAGEM DE RCD	36
2.5.1 <i>Britagem e peneiramento</i>	36
2.5.2 <i>Concentração densitária a úmido</i>	39
2.5.3 <i>Concentração e classificação pneumática</i>	41
2.5.4 <i>Separação óptica</i>	43
2.5.5 <i>Método "HRM" - Aquecimento e Atrição</i>	43
2.6 PRODUÇÃO DE AGREGADO MIÚDO A PARTIR DE RCD	45
2.6.1 <i>Produção de agregados miúdos</i>	46
2.6.2 <i>Processamento de agregado miúdo de RCD</i>	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 PRODUÇÃO DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	53
3.1.1 <i>Amostragem e preparação de amostras</i>	53
3.1.2 <i>Processamento de RCD para produção de agregado miúdo reciclado</i>	55
3.1.3 <i>Caracterização da amostra tal qual e do agregado miúdo gerado</i>	56

3.2	SEPARABILIDADE POR LÍQUIDO DENSO E CARACTERIZAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES POR MEV-MLA.....	58
3.2.1	<i>Estudos de separabilidade por líquido denso.....</i>	58
3.2.2	<i>Caracterização da associação das fases por MEV-MLA</i>	59
3.3	BENEFICIAMENTO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO	60
3.3.1	<i>Remoção da pasta de cimento por atrição.....</i>	61
3.3.2	<i>Separabilidade de agregados miúdos reciclados por elutriação</i>	62
3.3.3	<i>Concentração de agregados miúdos reciclados em mesa oscilatória</i>	63
3.3.4	<i>Concentração de agregados miúdos reciclados em espiral.....</i>	64
3.3.5	<i>Separação magnética em separador Frantz</i>	66
3.3.6	<i>Separação magnética em separador de rolos de terras raras RE-Roll.....</i>	68
3.3.7	<i>Caracterização dos produtos do beneficiamento</i>	71
4	RESULTADOS COMPARATIVOS DA CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA TAL QUAL E DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO	73
4.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	73
4.2	MORFOLOGIA DE PARTÍCULAS	75
4.3	ANÁLISE GRANULOQUÍMICA.....	76
4.4	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	81
4.5	POROSIDADE DOS AGREGADOS MIÚDOS	84
4.6	SEPARAÇÃO EM LÍQUIDOS DENSOS	85
4.6.1	<i>Amostra tal qual.....</i>	85
4.6.2	<i>Agregado miúdo da amostra tal qual e produtos do VSI.....</i>	86
4.7	CONCLUSÕES PARCIAIS DA PRODUÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS.....	88
5	RESULTADOS DA SEPARABILIDADE POR LÍQUIDO DENSO E CARACTERIZAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES POR MEV-MLA.....	90
5.1	SEPARABILIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS POR LÍQUIDOS DENSOS.....	90
5.1.1	<i>Conclusões sobre a separabilidade por líquido denso.....</i>	95
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES DAS FASES POR MEV-MLA	96
5.2.1	<i>Conteúdo das fases presentes</i>	97
5.2.2	<i>Associações entre as fases presentes</i>	101
5.2.3	<i>Partição do cálcio dentre as fases presentes</i>	106
5.2.4	<i>Correlação entre os resultados de MLA e FRX.....</i>	107
5.2.5	<i>Conclusões sobre a caracterização das associações por MEV-MLA</i>	108
6	RESULTADOS DO BENEFICIAMENTO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO.....	111
6.1	REMOÇÃO DA PASTA DE CIMENTO POR ATRIÇÃO.....	111
6.1.1	<i>Conclusões sobre a atrição na remoção da pasta de cimento</i>	114
6.2	SEPARABILIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS POR ELUTRIAÇÃO.....	114
6.2.1	<i>Conclusões sobre a separabilidade por elutriação.....</i>	119

6.3	CONCENTRAÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS EM MESA OSCILATÓRIA.....	119
6.3.1	<i>Ensaio exploratório em frações granulométricas estreitas</i>	119
6.3.2	<i>Ensaio no produto de britagem abaixo de 1,2 mm</i>	123
6.3.3	<i>Conclusões sobre a concentração em mesa oscilatória</i>	125
6.4	CONCENTRAÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS EM ESPIRAL	126
6.4.1	<i>Conclusões sobre a concentração em espirais</i>	132
6.5	SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS.....	133
6.5.1	<i>Separador magnético Frantz de barreiras</i>	133
6.5.2	<i>Separador magnético de rolo de terras raras (RE-Rol).....</i>	139
6.5.3	<i>Conclusões sobre separações magnéticas</i>	146
6.6	CONCLUSÕES PARCIAIS SOBRE O BENEFICIAMENTO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO	147
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	151
7.1	SUMÁRIO DOS RESULTADOS.....	151
7.2	CONCLUSÕES	153
7.3	ESTUDOS COMPLEMENTARES.....	156
	APÊNDICE 1 - Equipamentos de tratamento de minérios aplicados à reciclagem de RCD	176
	APÊNDICE 2 - Áreas de transbordo e triagem e usinas de reciclagem de RCD	179
	APÊNDICE 3 - Preparação de amostras e operação do MEV/MLA.....	185
	APÊNDICE 4 - Produção, beneficiamento e caracterização de agregado miúdo reciclado	188
	APÊNDICE 5 - Análises granuloquímicas (TQ, areias VSI)	198
	APÊNDICE 6 - Separações em líquido denso e caracterização das associações por MEV-MLA (VSI-75).....	199
	APÊNDICE 7- Composição dos produtos da elutriação (VSI 65-75)	207
	APÊNDICE 8 - Composição dos produtos da mesa concentradora (VSI 65-75)	208
	APÊNDICE 9 - Composição dos produtos das separações magnéticas (VSI 65-75)	209
	APÊNDICE 10 - Desempenho reológico de argamassas com agregados miúdos reciclados	212

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema das atividades envolvidas na produção de agregados miúdos reciclados (a. cominuição, b. separações das fases, c. caracterização dos produtos)	4
Figura 1.2 - Perspectiva do efeito da britagem na liberação entre as fases de rochas e a pasta de cimento na produção de agregado miúdo reciclado	6
Figura 2.1 - Taxas de reciclagem de RCD em países Europeus.....	11
Figura 2.2 - Fluxograma esquemático de produção de agregados reciclados para aplicações geotécnicas e em pavimentação	16
Figura 2.3 - Fluxograma esquemático de produção de agregados reciclados com um estágio de britagem e beneficiamento para aplicações em concretos	16
Figura 2.4 - Fluxograma de produção de agregados reciclados com dois estágios de britagem e beneficiamento para aplicações em concretos	17
Figura 2.5 - Fluxograma de produção de agregados reciclados de baixa porosidade segundo método Japonês HRM para aplicações em concretos	17
Figura 2.6 - Imagem ilustrativa de um agregado graúdo obtido pela da britagem de concreto	19
Figura 2.7 - Condições de umidade de agregados	30
Figura 2.8 – Figura esquemática do efeito do aquecimento e atrição na remoção da pasta de cimento (Nawa) e a influência na massa específica e absorção dos agregados reciclados	44
Figura 3.1 - Fluxograma esquemático do procedimento experimental.....	52
Figura 3.2 - Fluxograma esquemático de processamento e amostragem da usina Urbem	54
Figura 3.3 - Fluxograma esquemático da separação por espiral concentradora	66
Figura 3.4 - Procedimento da separação magnética em Frantz de barreiras	67
Figura 3.5 - Procedimento da separação magnética em RE-Roll.....	69
Figura 3.6 - Fluxograma da separação magnética em RE-Roll.....	70
Figura 4.1 - Distribuições granulométricas comparativas	73
Figura 4.2 - Distribuições em massa de agregados graúdos e miúdos (ULSEN, KAHN <i>et al.</i> , 2010) .	74
Figura 4.3 - Análise morfológica de agregados miúdos reciclados, distribuições nas classes de esfericidade e relação de aspecto para as frações acima de 0,60 mm	76
Figura 4.4 - Teores dos principais óxidos da amostra tal qual	77
Figura 4.5 - Comparativo entre a proporção em massa, teor e distribuição de CaO+PF	79
Figura 4.6 - Proporção relativa entre quartzo e aluminossilicatos a partir da relação $SiO_2/(K_2O+Na_2O)$	80
Figura 4.7 - Difrátogramas comparativos de frações granulométricas da amostra tal qual	81
Figura 4.8 - Difrátogramas comparativos fração -3,0+2,0 mm das areias do VSI.....	82
Figura 4.9 - Difrátogramas comparativos fração -0,60+0,30 mm das areias do VSI.....	82
Figura 4.10 - Porosidade ao mercúrio de agregados miúdos reciclados	84
Figura 4.11 - Distribuição em massa dos produtos de separação em líquido denso (a) por fração e (b) por intervalo granulométrico - amostra tal qual	85

Figura 4.12 - Porcentagem em massa do produto afundado em 2,6 g/cm ³ (a); massa, teor e distribuição de CaO+PF (b)	87
Figura 4.13 - Distribuição de agregados miúdos reciclados nos produtos de densidade da separação em líquidos densos	88
Figura 5.1 - Distribuição acumulada das principais fases	91
Figura 5.2 - Teores dos principais elementos dos produtos de separações em líquidos densos	92
Figura 5.3 - Difratogramas comparativos dos produtos da separação em líquido denso, fração - 1,2+0,60 mm	93
Figura 5.4 - Imagens dos produtos da separação em líquido denso, fração -2,0+1,2 mm	94
Figura 5.5 - Distribuição acumulada de SiO ₂ (a) e CaO+PF (b) nos produtos da separação em líquido denso	96
Figura 5.6 - Discriminação das principais fases presentes a partir de mapeamento de raios X do produto afundado em 2,6 g/cm ³	96
Figura 5.7 - Principais fases presentes nos produtos da separação em líquido denso determinada por MEV-MLA (% massa)	98
Figura 5.8 - Sumário da composição dos produtos da separação em líquido denso por frações granulométricas determinada por MEV-MLA (% massa)	99
Figura 5.9 - Sumário da composição dos produtos da separação em líquido denso determinada por MEV-MLA para a fração -3,0+0,15 mm (% massa)	99
Figura 5.10 - Imagens representativas das associações caracterizadas ao MEV-MLA	102
Figura 5.11 - Formas de associação das fases minerais com a pasta de cimento determinada por MEV-MLA	103
Figura 5.12 - Espectros de liberação das fases minerais determinada por MEV-MLA	105
Figura 5.13 - Correlações entre o conteúdo de fases determinadas por MEV-MLA e dos resultados de análises químicas	107
Figura 5.14 - Correlação entre o teor de pasta de cimento estimada por ataque ácido e pela soma dos teores de CaO com a perda ao fogo	110
Figura 6.1 - Teores e distribuição dos principais elementos do produto +0,15 mm em diferentes condições de atrição	113
Figura 6.2 - Difratogramas comparativos da fração +0,15 mm dos produtos da atrição em distintas condições	114
Figura 6.3 - Correlação entre a vazão e a velocidade do fluido para o diâmetro médio das partículas	115
Figura 6.4 - Teores (a) e distribuição (b) dos principais elementos do produto pesado da elutriação	116
Figura 6.5 - Difratogramas comparativos de produtos da elutriação	117
Figura 6.6 - Imagens representativas de produtos selecionados da elutriação	118
Figura 6.7 - Teores (a) e distribuição (b) dos principais elementos dos produtos pesados da concentração em mesa Wilfley	120
Figura 6.8 - Difratogramas comparativos de produtos de concentração em mesa Wilfley	121
Figura 6.9 - Imagens representativas de produtos de concentração em mesa Wilfley	122

Figura 6.10 - Teores (a) e distribuição (b) dos principais elementos dos produtos da concentração em mesa Wilfley, produto britado	124
Figura 6.11 - Difractogramas comparativos dos produtos da concentração em mesa Wilfley, produto britado	124
Figura 6.12 - Análises granulométricas e morfológicas comparativas dos produtos da concentração em mesa Wilfley, produto britado	125
Figura 6.13 - Fluxograma de concentração por espirais, Arranjo 1	127
Figura 6.14 - Distribuição granulométrica dos produtos da espiral, Arranjo 1	127
Figura 6.15 - Fluxograma de concentração por espirais, Arranjo 2	129
Figura 6.16 - Distribuição granulométrica dos produtos da espiral, Arranjo 2	129
Figura 6.17 - Fluxograma de concentração por espirais, Arranjo 3	131
Figura 6.18 - Distribuição granulométrica dos produtos da espiral, Arranjo 3	131
Figura 6.19 - Curvas de separabilidade magnética por classe de densidade	134
Figura 6.20 - Curvas de separabilidade magnética por fração granulométrica (a) e distribuição acumulada das principais fases presentes (b)	135
Figura 6.21 - Teores dos principais constituintes dos produtos das separações magnéticas em Frantz de barreiras	136
Figura 6.22 - Difractogramas comparativos de produtos da separação magnética para a fração - 2,0+1,2mm	137
Figura 6.23 - Difractogramas comparativos de produtos da separação magnética para a fração - 0,60+0,30mm	137
Figura 6.24 - Imagens representativas de produtos da separação em Frantz de barreiras	139
Figura 6.25 - Curvas de separabilidade magnética em Re-Roll acumuladas no produto não magnético, por fração granulométrica	140
Figura 6.26 - Teores dos principais constituintes dos produtos das separações magnéticas RE-Roll por fração	141
Figura 6.27 - Difractogramas comparativos de produtos da separação magnética em RE-Roll por fração granulométrica	142
Figura 6.28 - Imagens representativas de produtos da separação em RE-Roll por fração granulométrica	143
Figura 6.29 - Curvas de separabilidade magnética em Re-Roll do produto britado	144
Figura 6.30 - Teores dos principais constituintes dos produtos das separações magnéticas RE-Roll do produto britado	145
Figura 6.31 - Imagens representativas de produtos da separação em RE-Roll do produto britado ..	146
Figura 6.32 - Distribuição em massa na amostra para produtos com diferentes conteúdos de CaO+PF	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Métodos de análise de tamanho de partículas (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b)	22
Tabela 3.1 - Sumário dos produtos gerados na produção do agregado miúdo reciclado	56
Tabela 3.2 - Sumário dos produtos e características dos estudos no agregado miúdo reciclado	61
Tabela 3.3 - Condições operacionais das separações em Re-Roll	70
Tabela 3.4 - Caracterização dos produtos gerados nos estudos de melhoria da qualidade do agregado miúdo reciclado	71
Tabela 4.1- Análise granuloquímica da amostra TQ-areia e dos produtos do VSI	77
Tabela 4.2 - Estimativa da composição mineralógica por DRX em diferentes frações da amostra tal qual	83
Tabela 5.1 - Sumário dos resultados das separações em líquido denso, total calculado -3,0+0,15 mm	90
Tabela 5.2 - Composição dos produtos afundados em diferentes densidades determinada por MEV-MLA, total calculado -3,0+0,15 mm	100
Tabela 5.3 - Formas de associações das fases minerais determinada por MEV-MLA para produtos afundados em diferentes densidades, total calculado -3,0+0,15 mm	104
Tabela 5.4 - Proporção relativa de cálcio determinada por MEV-MLA nas fases portadoras	106
Tabela 6.1 - Distribuição em massa dos produtos da atrição, amostra VSI 65-75.....	111
Tabela 6.2 - Composição química de produtos de diferentes condições de atrição	112
Tabela 6.3 - Sumário dos resultados da elutriação, total calculado -2,0+0,15 mm	116
Tabela 6.4 - Sumário dos resultados de concentração em mesa Wilfley, total calculado -2,0+0,15 mm	120
Tabela 6.5 - Resultados de concentração em mesa Wilfley do produto britado	123
Tabela 6.6 - Comparação entre os produtos pesados obtidos por concentração em mesa oscilatória por fração e para o produto britado	126
Tabela 6.7 - Granulometria e forma de partículas por análise de imagens dinâmica, Arranjo 1	128
Tabela 6.8 - Granulometria e forma de partículas por análise de imagens dinâmica, Arranjo 2.....	130
Tabela 6.9 - Granulometria e forma de partículas por análise de imagens dinâmica, Arranjo 3.....	132
Tabela 6.10 - Sumário dos resultados da separação magnética em Frantz de barreiras, total calculado -3,0+0,15 mm.....	135
Tabela 6.11 - Sumário dos resultados de separação magnética em RE-Roll	140
Tabela 6.12 - Sumário dos resultados de separação magnética em RE-Roll, PB -1,2+0,15 mm...	144
Tabela 6.13 - Resultados comparativos dos produtos não-magnéticos das separações em RE-Roll por fração granulométrica e do produto britado	146
Tabela 6.14 - Resultado da separação em líquido denso dos produtos do RE-Roll	147
Tabela 6.15 - Propriedades dos principais produtos obtidos no beneficiamento do agregado miúdo reciclado	148

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do setor da construção no país é evidente, seja pelos novos empreendimentos que caracterizam tanto as grandes metrópoles como cidades menores das cinco regiões do país, ou pelas obras de infraestrutura e dos programas de habitação iniciados pelo governo federal nos últimos anos. No mesmo ano, apesar da crise econômica mundial do final de 2009, o crescimento do PIB (Produto Interno Bruto) da construção foi superior a 10% e, segundo estimativas, deve se manter em torno de 6 a 8% em 2011.

As preocupações com a sustentabilidade no meio ambiente construído devem-se ao fato de a construção ser o setor que mais consome recursos naturais no mundo (PINTO, 1999; JOHN, 2000), pela participação expressiva na taxa de geração de poluentes (JOHN, AGOPYAN *et al.*, 2001), por ser a maior fonte de geração dos resíduos sólidos urbanos (HENDRIKS, 2000b; JOHN, 2000), e pela sua importância no desenvolvimento econômico e social do país. Como consequência, o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) tornou-se uma questão econômica e ambiental prioritária em escala global (POON, 2007a).

Adicionalmente, no cenário mundial, verifica-se um movimento contrário à deposição de RCD em aterros sanitários. No Brasil, a resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 2002, foi criada com o objetivo de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos gerados pelas atividades relacionadas à construção, tais como a proibição da disposição destes em áreas não licenciadas, a atribuição da responsabilidade aos geradores, e obrigatoriedade da destinação a aterros específicos para a reutilização ou reciclagem futura.

Em 2008 já se notava um aumento expressivo no número de usinas de reciclagem instaladas no país (mais de 40 unidades, contra 2 unidades em 1995). No entanto, a taxa média de reciclagem destes resíduos ainda é muito restrita, tanto no Brasil, como no mundo, a exceção de alguns países europeus e asiáticos.

No Brasil, estima-se que sejam geradas cerca de 70×10^6 t de resíduos de construção e demolição (RCD) por ano (JOHN, ANGULO *et al.*, 2004). Considerando que a geração destes na malha urbana é contínua e que, diferentemente das jazidas, não deverão escassear no longo prazo, o desenvolvimento de tecnologias que permitam a reutilização destes como matéria-prima para construção contribuirá para a sustentabilidade no meio ambiente construído.

Adicionalmente, a instalação de usinas de reciclagem próximas ou mesmo dentro da malha urbana possibilita a redução significativa das distâncias de transporte, tanto do resíduo como do agregado reciclado. A redução do custo de transporte somada à receita adicional gerada pelo recebimento dos resíduos a serem processados podem tornar competitivas as atividades de processamento mais complexas e elaboradas, possibilitando a substituição de agregados finos naturais por reciclados com ganhos em ecoeficiência.

O RCD é composto por uma fração mineral, que se estima que represente mais de 90% do total de resíduos, e componentes orgânicos tais como plástico, papel e madeira. Dessa forma, o primeiro entrave na reciclagem de RCD é a seleção desses materiais que possuem tecnologias de reciclagem distintas. Uma vez tendo-se a fração mineral individualizada, o segundo impasse reside na escolha de um processo capaz de lidar com as diferenças de sua própria composição, ou seja, gerar um produto homogêneo a partir de um resíduo heterogêneo.

O agregado reciclado tem como principal aplicação o uso em pavimentação ou aplicações geotécnicas, que requerem propriedades mecânicas menos exigentes. Por outro lado, usinas européias e japonesas investem na melhoria máxima da qualidade do agregado reciclado para aplicações mais restritivas, tal como para uso em concreto estrutural. Entretanto, nesses casos, nem sempre se encontra um mercado capaz de absorver os custos de produção do material reciclado.

Logo, do ponto de vista de pesquisa e inovação, o desafio reside em desenvolver tecnologias de reciclagem e formulação de produtos para ampliar os mercados potenciais para utilização dos agregados reciclados. Em um cenário ideal, focado na máxima utilização dos resíduos, a produção de agregados reciclados

deve ser flexibilizada em função do balanço entre os custos de produção, as aplicações potenciais e a demanda de materiais em um dado momento e local.

O estudo de aplicações de agregados reciclados e de processos de reciclagem tem sido investigado por pesquisadores da Escola Politécnica da USP há quase dez anos, em um grupo multidisciplinar que envolve os Departamentos de Engenharia de Minas e de Petróleo e de Construção Civil.

Em um contexto mais amplo foram geradas diversas publicações e participações em eventos internacionais pelos membros do grupo, tendo estes recebido alguns prêmios¹ atribuídos às diferentes frentes da pesquisa corrente.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

A proposta deste trabalho consiste no emprego de ferramentas de caracterização tecnológica de matérias-primas minerais e de operações unitárias de tratamento de minérios para avaliar as possibilidades de obtenção de agregados miúdos (areia) com reduzido conteúdo de pasta de cimento a partir do processamento integral de resíduos de construções e demolições, com vistas a sustentabilidade no setor da construção.

Para alcançar esse objetivo foram avaliadas distintas operações unitárias para remoção da pasta de cimento e outras fases porosas, em uma abordagem inovadora, tanto nos processos de tratamento de minérios: cominuição seletiva, atrição, separações densitárias e magnéticas, como nos métodos de caracterização dos produtos obtidos.

O trabalho foi desenvolvido em três principais etapas, tal como apresentado no esquema da Figura 1.1 e descrito a seguir.

¹ Prêmios e títulos podem ser visualizados no curriculum lattes dos pesquisadores.

Figura 1.1 - Esquema das atividades envolvidas na produção de agregados miúdos reciclados (a. cominuição, b. separações das fases, c. caracterização dos produtos)

Produção de agregado miúdo: produção de agregado miúdo (adequação da granulometria) por meio da cominuição seletiva das fases porosas e geração de partículas arredondadas por britagem terciária em britador de impacto vertical (VSI).

Separações das fases: avaliação da densidade e susceptibilidade magnética como propriedades diferenciadoras entre partículas com diferentes conteúdos de pasta de cimento objetivando-se a obtenção de dois produtos - um rico em partículas minerais e outro rico em pasta de cimento.

Caracterização dos produtos: desenvolvimento de procedimentos de caracterização dos produtos a fim de se avaliar a eficiência dos processos de separação.

1.2 INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E JUSTIFICATIVAS

A escassez de areia nas grandes metrópoles, somada ao aumento de 100% no preço médio deste bem mineral nos últimos quatro anos na cidade de São Paulo², a abundância de resíduos da construção e os elevados custos para deposição em aterros de inertes foram fatores que encorajaram o desenvolvimento da pesquisa com foco na produção de agregados miúdos reciclados (areia) a partir do processamento de resíduos de construção e demolição.

Do ponto de vista técnico, sabe-se que o processamento é determinante nas características e propriedades do agregado reciclado obtido (YAGISHITA, F, SANO, M *et al.*, 1994; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2000a; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2004; SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2005; TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005; LI, XIAO *et al.*, 2009; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, July 4-9, 2000). Como premissa para a eficiência das operações de tratamento de minérios, são necessárias duas condições: liberação e separação, sendo que a segunda é impraticável se a primeira não for bem sucedida (GAUDIN, 1932). O processamento consiste, portanto, em uma etapa inicial de cominuição para promover a liberação entre as fases e para adequação da granulometria para as etapas subsequentes, seguido da concentração propriamente dita.

A inovação da presente pesquisa consiste em desenvolver um processo de produção de agregados miúdos a partir do processamento integral de resíduos de construção e demolição, em uma abordagem inédita mundialmente. Uma vez atingida a liberação das fases, são avaliadas diferentes propriedades diferenciadoras capazes de separar as fases porosas ricas em pasta de cimento das fases minerais puras.

Do ponto de vista do processamento, a principal vantagem na produção de agregados miúdos reciclados, ao invés de grãos, deve-se ao fato de que a cominuição em agregados mais finos possibilita a geração de maior número de partículas livres de pasta de cimento, compostas exclusivamente por fases minerais (esquema ilustrativo na Figura 1.2).

² Dados da autora.

Figura 1.2 - Perspectiva do efeito da britagem na liberação entre as fases de rochas e a pasta de cimento na produção de agregado miúdo reciclado

Além da possibilidade de produção de um agregado miúdo com menor conteúdo de pasta de cimento aderida, a areia encontra um vasto mercado de aplicação em argamassas, onde as exigências mecânicas são menores e outras propriedades passam a ser mais relevantes, além da porosidade do agregado. Dentre estas, destaca-se o comportamento reológico controlado pela distribuição granulométrica (OLIVEIRA, STUDART *et al.*, 2000; COSTA, 2006) e morfologia das partículas (GONÇALVES, ARTHUSO *et al.*, 2000).

As fases porosas geradas na separação são ricas em pasta de cimento, com elevados teores de cálcio, e podem, portanto, encontrar aplicações ecoeficientes na fabricação de cimento em substituição aos carbonatos, com minimização nas emissões de CO₂, ou mesmo como *filler* mediante processamento.

A alternativa proposta contribui com a ampliação das taxas de reciclagem de resíduos e com o fechamento do ciclo dos materiais de construção. Está alinhada com a política internacional de desenvolvimento sustentável e preservação ambiental, fundamental para o avanço produtivo do país.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Capítulo 1 - Introdução. Apresenta o trabalho desenvolvido, situa o leitor no contexto geral de desenvolvimento da pesquisa em questão e define os objetivos.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica. Apresenta o estado da arte dos processos de reciclagem e das aplicações com agregados reciclados. Aborda ainda uma revisão dos procedimentos de caracterização empregados, das operações unitárias de tratamento de minérios passíveis de serem aplicadas à reciclagem de RCD e as alternativas para o beneficiamento de agregados miúdos reciclados.

Capítulo 3 - Materiais e métodos. Detalha o procedimento experimental empregado e os materiais estudados. As atividades podem ser sumarizadas basicamente em quatro etapas:

- a. *Produção de agregado miúdo reciclado:* define o local e procedimento da amostragem e descreve os procedimentos empregados no processamento de todo resíduo amostrado com foco na produção de agregado miúdo.
- b. *Beneficiamento do agregado miúdo reciclado:* envolve estudos de remoção da pasta de cimento aderida no agregado miúdo produzido, por meio de atrição e de estudos de separabilidade considerando as propriedades diferenciadoras densidade/porosidade e susceptibilidade magnética.
- c. *Caracterização tecnológica dos produtos obtidos:* atividade presente em todas as etapas consideradas; utilizada como ferramenta de controle de qualidade dos produtos e avaliação da eficiência dos processos considerados.
- d. *Estudos de separabilidade por líquido denso e caracterização das associações por MEV-MLA:* avaliação da separabilidade do agregado miúdo reciclado em intervalos de densidades crescentes e desenvolvimento de um método de caracterização dos produtos obtidos em uma abordagem inovadora, com detalhamento das associações da pasta de cimento e análises de liberação.

Capítulo 4 - Resultados comparativos da caracterização da amostra tal qual e do agregado miúdo reciclado. Apresenta, comparativamente, as propriedades de agregados miúdos gerados na produção de agregados graúdos por britagem e dos

gerados por britagem terciária em VSI. Para cada etapa foram avaliadas as propriedades mais relevantes: distribuição granulométrica, morfologia de partículas, composição química e mineralógica, porosidade, absorção de água e distribuição da pasta de cimento nos produtos.

Capítulo 5 - Resultados da separabilidade por líquido denso e caracterização das associações por MEV-MLA. Discussão minuciosa das propriedades do agregado miúdo gerado pela britagem terciária e dos resultados da caracterização das associações das fases por MEV-MLA.

Capítulo 6 - Resultados do beneficiamento do agregado miúdo reciclado. Discussão dos resultados obtidos frente às alternativas de beneficiamento avaliadas: remoção da pasta por atrição, concentração densitária e separações magnéticas. Ao final de cada item é apresentado um sumário dos principais resultados.

Capítulo 7 - Considerações finais. O capítulo encerra a tese retomando os principais aspectos abordados, os resultados mais significativos e encerra com as conclusões e reflexões sobre o tema, além de sugestões para estudos complementares.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Agregados são materiais granulares, sem forma ou volume definidos, com dimensões e propriedades para uso em obras de engenharia civil (LA SERNA e REZENDE, 2009).

Em relação à dimensão, são classificados pela norma Brasileira (ABNT, 2005b) em agregados graúdos (com mais de 95% em massa retida na peneira de abertura de 4,75 mm), miúdos (pelo menos 95% em massa passante na peneira de abertura 4,75 mm) e finos (material granular que passa na peneira com abertura de malha de 0,15 mm).

No Brasil, os agregados graúdos ou brita são produzidos a partir da britagem das rochas granito (85%) e gnaiss, seguidos por calcários (5%), dolomitos, basaltos (5%) e diabásios, em regiões em que os primeiros são escassos (DNPM, 2006). Os agregados miúdos ou areia são extraídos de várzeas e leitos de rios, depósitos lacustres e mantos de decomposição de rochas. A britagem de rochas para geração de areia artificial tem sido uma fonte alternativa de produção de agregados miúdos para utilização em concreto e argamassa, impulsionado pela crescente escassez de areia natural e às restrições ambientais e bloqueios de jazidas, principalmente nas maiores metrópoles brasileiras.

A mineração de agregados para a construção apresenta grandes volumes de produção, beneficiamento simples, baixo valor comercial e elevado custo de transporte - 1/3 do preço da areia e 2/3 do preço da brita (LA SERNA e REZENDE, 2009). A produção nacional de areia e brita supera os 500 milhões t/ano (LA SERNA e REZENDE, 2009); nos EUA esse valor é superior a 2 bilhões t/ano (op. cit.).

As restrições de exploração de areia e brita nas proximidades dos aglomerados urbanos e grandes centros consumidores têm preocupado o setor mineral. O bloqueio de jazidas devido à expansão de áreas urbanas, as restrições da legislação ambiental e de zoneamento para novos empreendimentos e a

rivalidade pelo uso econômico do solo tem impacto direto sobre as perspectivas de custo e suprimento destes bens minerais (op. cit.).

2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E RECICLAGEM

A indústria da construção consome uma quantidade enorme de matérias-primas naturais, assim como gera grande quantidade de resíduos, denominados resíduos de construção e demolição (RCD). Considera-se que RCD seja todo e qualquer resíduo oriundo das atividades de construção, reparos, reformas ou demolições de pequenos ou grandes empreendimentos, obras de arte de engenharia, dentre outros (WILSON, 1996; ANGULO, 2000; COMMISSION, 2000; SCHULTMANN e RENTZ, 2000; FERRAZ, 2001).

Com o crescimento evidente do setor da construção em muitos países, o gerenciamento dos resíduos gerados associado ao aumento do consumo de matérias-primas não renováveis e das distâncias de transporte dos grandes centros consumidores tornou-se uma questão econômica e ambiental prioritária mundialmente (POON, 2007a).

Estima-se que o total de RCD gerado em cidades de médio a grande porte seja de 13 a 67% (HENDRIKS, 2000b; JOHN, 2000) em massa de todo o resíduo sólido urbano gerado (RSU) - no Brasil esse valor é estimado em 50% (PINTO, 1999). A preocupação recorrente se deve essencialmente à destinação destes resíduos.

No Brasil, são geradas mais de 70×10^6 t de RCD por ano (dados de 2003 apontavam para esse montante segundo (JOHN, ANGULO *et al.*, 2004), ou seja, quantidade superior a 400 kg/hab.ano, sendo que até 2002 apenas 12 municípios (0,2% do total) tinham usinas de reciclagem de RCD (NUNES, MAHLER *et al.*, 2007). Estima-se que a capacidade máxima instalada nas usinas de reciclagem no Brasil seja de 3,6% do total do RCD gerado (MIRANDA, ANGULO *et al.*, 2009).

Em Hong Kong, a geração de RCD em um período de dez anos (de 1993 a 2004) mais do que duplicou. Em 2004 foram gerados cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos, quantidade de quatro a cinco vezes superior ao total dos resíduos sólidos municipais (doméstico+comercial+industrial). Deste total, 12%

foram dispostos em aterros e 88% utilizados para preenchimento de áreas públicas (POON, 2007a). Em 2006 40% da capacidade disponível em aterros estavam preenchidas, indicando que em um período de cinco a nove anos os aterros estarão esgotados (POON, 2007b).

Na União Européia, segundo relatório de 2010 da Agência Ambiental³ (AGENCY, 2010), nos anos de 2006 e 2007 foram geradas cerca de 971 milhões de toneladas de RCD, o que corresponde a 32% de todo RSU. A taxa de reciclagem média dos países integrantes é de 53% com meta de chegar a 70% em 2020, já que alguns países apresentam índices ainda incipientes (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Taxas de reciclagem de RCD em países Europeus

Outros países como Austrália (13×10^6 t de RCD, 42% do RSU) e Japão apresentam taxas de reciclagem de cerca de 50% do resíduo gerado (TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005; TAM, 2009).

Em geral, o RCD é composto por uma parcela expressiva de materiais inorgânicos e uma parcela menor de orgânicos (madeira, papel, plástico, dentre outros). A reciclagem de RCD refere-se usualmente à fração mineral do resíduo, composta por materiais de construção, como concreto, argamassas, cerâmicas e rochas, que representam, em geral, mais de 90% do RCD (CARNEIRO, CASSA *et al.*, 2000; HENDRIKS, 2000b; FERRAZ, 2001).

³ The European Environment Agency.

A composição do RCD depende essencialmente da natureza dos processos construtivos e, conseqüentemente, dos materiais empregados. Austrália (TAM, 2009) e Japão (TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005) têm seus resíduos compostos basicamente por concreto. No Brasil a predominância é por resíduos mistos (concreto+alvenaria), assim como em muitos países europeus.

Em usinas de reciclagem é comum a classificação do RCD em resíduos de concreto ou resíduos mistos (HENDRIKS, 2000b), os quais são processados separadamente. Os primeiros são compostos essencialmente por componentes de construção de origem cimentícia; em virtude de sua coloração algumas vezes é também denominado "RCD - cinza". Os resíduos mistos são compostos pela mistura de concreto, argamassas, tijolos e alvenarias em diferentes proporções; são também denominados "RCD - vermelho", dada a coloração produzida pela presença de material cerâmico.

Pesquisadores de diferentes países vêm demonstrando as possibilidades de reciclagem destes resíduos em matérias-primas para aplicações em sub-bases de pavimentação, concretos e argamassas. Apesar da comprovada viabilidade técnica, a reciclagem dos RCD enfrenta alguns impasses, tais como: controlar a variabilidade na composição dos resíduos (ANGULO, 2000), a dificuldade na separação dos contaminantes orgânicos presentes, a carência de informações sobre as características tecnológicas dos resíduos, a falta de políticas públicas mais contundentes, e principalmente a insuficiência de tecnologias e usinas de processamento hábeis para produzir um agregado reciclado de baixa porosidade.

Como resultado, uma grande parcela de resíduos potencialmente recicláveis acabam em aterros ou áreas de deposição. No entanto, devido às crescentes preocupações com o meio ambiente e desenvolvimento sustentável, alguns países já fazem uso de novas especificações e regulamentações para o uso do agregado reciclado, na Europa, Japão e Estados Unidos (POON, 2007a). Tais incentivos incluem o aumento dos custos de deposição em aterros, a criação de taxas para o uso de agregados naturais e incentivos para o desenvolvimento de tecnologias e instalação de usinas de reciclagem. Estas práticas já estão mais estabelecidas na Europa, que tem países cujas taxas de reciclagem são da ordem de 90%.

Entretanto, apesar da exaustão de áreas de deposição em diversos países, a expansão da reciclagem ainda é limitada pelos reduzidos custos de deposição de resíduos, disponibilidade de agregados naturais a preços acessíveis, ausência de normas regulamentadoras e incentivos fiscais para o uso de agregados reciclados e falta de conhecimento sobre o desempenho tecnológico deste material em longo prazo (POON, 2007a).

A superação de tais barreiras demanda maior comprometimento das autoridades no estabelecimento de políticas de incentivo do uso de agregados reciclados, particularmente em obras do governo e na indústria de materiais pré-fabricados (maior facilidade de controle de qualidade dos produtos).

2.3 PROCESSOS DE RECICLAGEM E APLICAÇÕES DE AGREGADOS RECICLADOS

As aplicações dos agregados reciclados estão relacionadas com as suas propriedades tecnológicas, que por sua vez então dependem da composição do resíduo, particularmente no que se refere ao conteúdo de fases porosas. Dessa forma, o processo de produção de agregados reciclados é essencial e determinante na qualidade dos agregados gerados (YAGISHITA, F, SANO, M *et al.*, 1994; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2000a; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2004; SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2005; TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005; LI, XIAO *et al.*, 2009; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, July 4-9, 2000).

Dados da literatura apontam que a reciclagem de resíduos da construção teve início na Europa e no Japão após a Segunda Guerra Mundial, na reconstrução das cidades no pós-guerra (HENDRIKS, 2000b; POON, 2007a), muito embora dados históricos evidenciem que os romanos e outros povos primitivos já faziam uso dos resíduos como matéria-prima.

A aplicação mais difundida e descrita para os agregados reciclados ocorre em aplicações geotécnicas como material de preenchimento de valas (POON, 2007a) e em bases de pavimentação (CHINI, KUO *et al.*, 2001; POON, KOU *et al.*, 2002; POON e CHAN, 2006; LEITE, MOTTA *et al.*, 2011). No Brasil e em outros países os processos de reciclagem, neste caso, envolvem basicamente britagem (mandíbulas

ou impacto) e peneiramento a seco. A remoção dos componentes de aço é feita por um extrator de metais ou manualmente, assim como a separação dos materiais orgânicos. Neste caso, tanto os agregados graúdos como os miúdos são utilizados.

A crescente preocupação com o gerenciamento dos resíduos, a menor disponibilidade de matérias-primas naturais, a escassez de locais para deposição, os elevados custos de transporte dos resíduos e de agregados, dentre outros fatores, possibilitaram o desenvolvimento de processos de reciclagem de maior complexidade, principalmente na Europa e Japão, para agregação de valor ao produto com foco nas aplicações em concretos (LIMBACHIYA, LEELAWAT *et al.*, 2000; SAGOE-CRENTSIL, BROWN *et al.*, 2001; AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002; POON, KOU *et al.*, 2002; DE BRITO, PEREIRA *et al.*, 2005; EVANGELISTA e DE BRITO, 2007; CACHIM, 2009).

Usinas européias empregam um ou dois estágios de britagem (mandíbulas, impacto ou giratório) para adequação da granulometria dos agregados e empregam operações unitárias de beneficiamento mineral para separação dos materiais orgânicos e remoção das fases de maior porosidade (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009b). Destas, citam-se:

- Remoção de fases metálicas por extrator de sucatas;
- Lavagem intensiva do agregado graúdo em equipamento rotativo (*drum washer*, usina alemã BBW Recycling Mittelbe) para promover a atrição e remoção de finos e fases mais frágeis;
- Concentração densitária em jigge Baum (usina VAR na Holanda);
- Remoção de contaminantes orgânicos por meio de classificação pneumática (usina VAR na Holanda) ou por seleção manual em transportadores de correia em cabine pressurizada (usina alemã Graf Baustoffe).

No Japão, a produção de agregados reciclados de alta qualidade é direcionada essencialmente na melhoria dos processos de remoção da pasta de cimento em resíduos de concreto (TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005). Tais processos podem ser por cominuição+atrição em britador vertical de rotor

excêntrico⁴ (usina R.CON) ou pela fragilização da pasta cimentícia por aquecimento seguida de sua remoção por atrição e peneiramento (método HRM, usina SEIYU).

Fluxogramas esquemáticos de operação de usinas de reciclagem com foco na produção de agregados graúdos para diferentes aplicações são apresentados na Figura 2.2 (agregados para aplicações de baixo desempenho mecânico), Figura 2.3 e Figura 2.4 (produção de agregados reciclados para concreto com um e dois estágio de britagem, respectivamente) e Figura 2.5 (método japonês "HRM"). Os esquemas apresentados resultam da compilação de fluxogramas apresentados por Angulo e colaboradores (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009b) na discussão de usinas de processamento presentes na Europa, de visitas técnicas nacionais e internacionais e trabalhos anteriormente publicados, (TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005; ULSEN, 2006).

Uma tecnologia recentemente desenvolvida no país é um sistema simplificado de processamento que dispensa o uso de britador, o qual é responsável por a maior parte da energia empregada na reciclagem dos resíduos. Essa alternativa foi considerada, dado que cerca de metade (ou mais) da fração mineral dos RCD tem dimensões e propriedades para uso como agregados para bases de pavimentação. Esta solução alia menores investimentos em equipamentos, redução substancial no consumo de energia e mobilidade potencial (transportado por carretas) (AGOPYAN e JOHN, 2011).

⁴ Equipamento "Eccentric rotor-type mechanical grinder" foi desenvolvido por empresas locais. É similar ao britador cônico, porém as paredes do rotor são paralelas à câmara de britagem.

Figura 2.2 - Fluxograma esquemático de produção de agregados reciclados para aplicações geotécnicas e em pavimentação

Figura 2.3 - Fluxograma esquemático de produção de agregados reciclados com um estágio de britagem e beneficiamento para aplicações em concretos

Figura 2.4 - Fluxograma de produção de agregados reciclados com dois estágios de britagem e beneficiamento para aplicações em concretos

Figura 2.5 - Fluxograma de produção de agregados reciclados de baixa porosidade segundo método Japonês HRM para aplicações em concretos

Em todas as usinas de reciclagem de RCD descritas na literatura o foco é a produção de agregados graúdos. A fração areia (agregados miúdos), apesar de representar de 40% a 60% em massa do resíduo (ULSEN, HAWLITSCHKEK *et al.*, 2010), é usualmente utilizada em bases de pavimentação (aplicação de baixo valor) ou descartada como resíduo da própria reciclagem. Nas usinas japonesas os finos gerados caracterizam-se pelo elevado teor de pasta de cimento e, por isso, são também empregadas em aplicações mais nobres na estabilização de solo ou matéria-prima na indústria do cimento devido ao elevado teor de cálcio (SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2005).

Contrapondo este cenário, as maiores metrópoles brasileiras enfrentam dificuldades com a escassez de areia para construção em virtude do esgotamento das minerais próximas à região metropolitana e às crescentes restrições ambientais à utilização de várzeas e leitos de rios para extração de areia. Como decorrência, nota-se um aumento da distância de procedência de matéria prima alcançando de 100 a 250 km, além do crescimento do número de extrações ilegais de areia.

A escassez de areia, a abundância de resíduos da construção e os elevados custos para deposição dos resíduos em aterros foram fatores que encorajaram o desenvolvimento deste projeto que propõe uma nova abordagem sobre o processamento de RCD e uma contribuição efetiva à sustentabilidade no meio ambiente construído.

Neste sentido, este trabalho discute a produção de areia reciclada a partir de mecanismos que proporcionam intensa atrição para maior remoção da pasta de cimento aderida, a exemplo dos processos japoneses, conjugada a técnicas de separações minerais para remoção das fases de maior porosidade, tal como processos de usinas européias. O processamento dos resíduos é focado exclusivamente na produção de areia, ou seja, o RCD é integralmente cominuído na granulometria de areia e beneficiado para remoção de finos e fases porosas, em uma abordagem inédita mundialmente.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS RECICLADOS

Os agregados reciclados resultam do processamento de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Dessa forma, diferem dos agregados britados (brita) ou naturais (areia) visto que, além do agregado natural (rocha britada), os reciclados são compostos também pela pasta de cimento resultante de construções anteriores que permanece aderida a superfície dos agregados reciclados (Figura 2.6) (ETXEBERRIA, VAZQUEZ *et al.*, 2007; DE JUAN e GUTIERREZ, 2009).

Figura 2.6 - Imagem ilustrativa de um agregado graúdo obtido pela da britagem de concreto

A pasta de cimento somada a outros contaminantes presentes no RCD exercem uma influência negativa nas propriedades físicas, mecânicas e químicas dos agregados reciclados (ETXEBERRIA, VAZQUEZ *et al.*, 2007; RAHAL, 2007; DE JUAN e GUTIERREZ, 2009; DEBIEB, COURARD *et al.*, 2009).

As propriedades dos agregados reciclados estão relacionadas com as características dos resíduos que lhe deram origem (TAM, WANG *et al.*, 2008) e com as operações de processamento empregados na usina de reciclagem (ETXEBERRIA, VAZQUEZ *et al.*, 2007; DE JUAN e GUTIERREZ, 2009).

Os procedimentos tradicionalmente empregados na caracterização de agregados produzidos a partir de RCD baseiam-se essencialmente nas seguintes

determinações: a) composição de fases de concreto, alvenaria, materiais orgânicos e metal (DIN, 2002b) por meio de seleção manual (ou catação); b) medidas de propriedades físicas relevantes para sua aplicação, tais como massa específica aparente ou proporção de material abaixo de determinada densidade (RECOMMENDATION, 1994) ou absorção de água (RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000a; DIN, 2002a; ABNT, 2004); c) teores de íons solúveis como cloretos e sulfatos (RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000a; DIN, 2002a; ABNT, 2004).

Esses métodos, entretanto, não trazem informações sobre a composição química e mineralógica dos agregados reciclados, como também não incluem parâmetros fundamentais para o desempenho dos agregados reciclados, tais como o teor de pasta de cimento (ETXEBERRIA, VAZQUEZ *et al.*, 2006) e a presença de argilominerais e minerais micáceos (BIANCHINI, MARROCCHINO *et al.*, 2005; LIMBACHIYA, MARROCCHINO *et al.*, 2007).

O desenvolvimento de procedimentos de caracterização de agregados reciclados é, portanto, necessário, podendo resultar no diagnóstico de novas aplicações potenciais para resíduos com diferentes características (MUELLER, 2003; BIANCHINI, MARROCCHINO *et al.*, 2005). A implantação de procedimentos de caracterização como ferramenta de controle de qualidade de produto, com vistas às propriedades relevantes ao desempenho dos agregados, aumentam a confiabilidade na utilização de agregados reciclados, facilitando a ampliação de seu mercado (ANGULO, 2005).

Consideram-se, portanto, parâmetros fundamentais na caracterização de agregados reciclados as seguintes propriedades:

- Distribuição granulométrica das partículas. Parâmetro que influencia as propriedades reológicas de concretos (PILEGGI e PANDOLFELLI, 1999; OLIVEIRA, STUDART *et al.*, 2000; PILEGGI e PANDOLFELLI, 2002) e argamassas (OLIVEIRA, STUDART *et al.*, 2000; COSTA, 2006);
- Morfologia das partículas. Propriedade que influencia o comportamento no estado fluido e no estado endurecido de argamassas e concretos (GONÇALVES, ARTHUSO *et al.*, 2000);

- Composição química (LIMBACHIYA, MARROCCHINO *et al.*, 2007) e mineralógica (BIANCHINI, MARROCCHINO *et al.*, 2005; ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009);
- Teor de pasta de cimento;
- Propriedades microestruturais (MILLER e LIN, 2004; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2004);
- Massa específica aparente e porosidade (ANGULO, 2005).

Já na indústria mineral, a caracterização tecnológica de matérias-primas minerais, pressupõe o estudo das propriedades dos materiais tendo em vista o seu comportamento no processo de beneficiamento e o atendimento às especificações de mercado (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997). Esta tem por objetivo estabelecer as associações das fases presentes para dar suporte às etapas de exploração mineira ou lavra, às atividades de beneficiamento/usina ou de adequação para a indústria de transformação (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997; PETRUK, 2000).

É realizada por meio de uma série de ensaios e análises laboratoriais, segundo sequência de procedimentos e critérios planejados fundamentalmente em função do material em estudo. Nos concentrados obtidos pelo processamento os estudos objetivam a determinação dos teores e distribuições dos elementos de interesse (elemento útil), nos rejeitos o objetivo principal é a avaliar as perdas do elemento de interesse e a composição do material para uma destinação ambientalmente adequada (PETRUK, 2000).

De forma análoga, a caracterização aplicada aos agregados reciclados visa estudar as propriedades destes com vistas a sua utilização como matéria-prima para construção e dar suporte às atividades de beneficiamento como forma de controle de qualidade de produção. Neste caso, os parâmetros mais relevantes na caracterização passam a ser o teor de pasta de cimento, a porosidade do agregado/absorção de água e a distribuição de tamanho e forma de partículas.

2.4.1 Distribuição granulométrica

A morfologia dos agregados foi por muito tempo considerada a característica geométrica de maior influência nas propriedades da argamassa (SELMO, 1986) ao

interferir na sua trabalhabilidade (DAVISON, 1974; SABBATINI, 1986; D'AGOSTINO, 2004).

No entanto, o desenvolvimento da ciência dos materiais mostra a importância da determinação da distribuição do tamanho das partículas que compõem a mistura nas propriedades reológicas de argamassas (OLIVEIRA, STUDART *et al.*, 2000; COSTA, 2006) e concretos (PILEGGI e PANDOLFELLI, 1999; OLIVEIRA, STUDART *et al.*, 2000; PILEGGI e PANDOLFELLI, 2002). Assim, a determinação da distribuição granulométrica torna-se indispensável para os estudos de desempenho de agregados.

Além disso, outros parâmetros apresentam estreita correlação com a granulação das partículas, particularmente no caso de agregados de RCD, tais como: composição química e mineralógica (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009), o teor de pasta de cimento aderida (DE JUAN e GUTIERREZ, 2009), a absorção de água e a distribuição nos produtos de densidade (ULSEN, 2006).

Existem diversos métodos e equipamentos para que se determine a distribuição de tamanho de partículas; um sumário dos métodos e condições de operação é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Métodos de análise de tamanho de partículas (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b)

Método	Meio	Fracionamento de amostras	Intervalo granulométrico (μm)
Peneiramento	seco ou úmido	sim	5-100.000
Elutriação (<i>cyclosizer</i>)	úmido	sim	5-45
Sedimentação	úmido	sim	1-70
Difração a laser	seco ou úmido	não	0,1-9.000
Microscopia óptica	seco ou meio líquido	não	0,2-50
Microscopia eletrônica	seco	não	0,005-100

A escolha do sistema de análise granulométrica deve ser feita com base no tamanho das partículas, da possibilidade de operação em meio aquoso e se há necessidade de fracionamento da amostra, ou seja, geração de alíquotas em cada intervalo granulométrico. É de se destacar que as técnicas de determinação de tamanho de partículas medem propriedades diferentes e, portanto, os resultados

referem-se a distintos diâmetros médios, cujos resultados não podem ser comparados diretamente (ALLEN, 1997). Dentre os métodos acima, o peneiramento é um dos mais antigos (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b) e utilizados.

2.4.2 Morfologia de partículas

Caracterizar a morfologia (e a distribuição granulométrica) de partículas é uma demanda de extrema importância na área de agregados e materiais cimentícios, sobretudo quando se considera a produção de argamassas e concretos. Isto porque tais características físicas influenciam diretamente no comportamento no estado fluido e no estado endurecido desses materiais sendo, portanto, fundamentais nos procedimentos de formulação de composições (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000).

Adicionalmente, é crescente o interesse pelo empacotamento das partículas nas diferentes áreas da engenharia. Uma revisão dos fatores que afetam o empacotamento de partículas, tais como distribuição granulométrica, morfologia das partículas, textura superficial e porosidade de partículas, é abordada por Castro e Pandolfelli (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Uma das dificuldades encontradas para a substituição de agregados miúdos de origem sedimentar por material artificial ou reciclado é que estes apresentam grãos mais angulosos (RAVINDRARAJAH e TAM, 1985) e morfologia irregular para boas misturas (HANSEN e NARUD, 1983). O trabalho desenvolvido por Stark e Mueller (STARK e MUELLER, 2008) demonstrou que a morfologia de agregados miúdos reciclados interfere diretamente na densidade de empacotamento, a qual por sua vez interfere na trabalhabilidade das argamassas.

O procedimento para determinação do índice de forma em agregados *gráudos* (acima de 4,8 mm) é descrito pela norma brasileira (ABNT, 2008) e consiste na determinação do maior e menor diâmetro de cada partícula (índice de forma ou relação de aspecto), através de medidas em paquímetro, de até 32 kg de amostra. Este método é moroso, dependente do operador e apresenta baixa reprodutibilidade por considerar um número muito limitado de partículas analisadas (poucas centenas de partículas).

Na indústria mineral, tradicionalmente, a análise de forma de partículas é realizada por meio de análise de imagem, ferramenta que propicia a determinação das feições ou parâmetros avaliados na estereologia. Estereologia, por sua vez, compreende o estudo das relações entre estruturas ou feições tridimensionais de uma amostra e seus parâmetros de medidas em imagens bidimensionais (RUSS, 1986). O objetivo da estereologia é caracterizar numericamente aspectos geométricos de feições da microestrutura de interesse propiciando a avaliação de tamanho, forma e orientação (UNDERWOOD, 1970). A obtenção de informações quantitativas é realizada por meio de análise de imagens (JONES, 1987; MAINWARING e PETRUK, 1989).

Procedimentos manuais com emprego de contadores de pontos e utilização de acessórios mecânicos e eletromecânicos acoplados com porta-amostras de microscópios ópticos foram utilizados por várias décadas na caracterização de rochas e minérios (CHAYES, 1956; DUNLEVEY, 1991).

A partir dos anos 1970 foram paulatinamente introduzidos os sistemas de análise de imagens ou, mais usualmente chamados analisadores de imagens, que consistem em programas de computador para aquisição e processamento de imagens e a obtenção automaticamente das medidas das feições de interesse.

A sistematização dos procedimentos, aliada ao acréscimo da base amostral, impulsionou a utilização destes sistemas particularmente a partir da década de 1990. Estas análises cujas amostras são dispostas sobre uma superfície plana, suportes ou lâminas, são denominadas análises de forma estáticas e normatizadas pela ISO 13322-1/04 (ISO, 2004). No entanto, a aquisição das imagens por meio de sistemas de microscopia óptica (MO) ou eletrônica de varredura (MEV) compreende uma atividade morosa e exaustiva, o que dificulta a caracterização de um número suficiente de partículas de forma a garantir a representatividade estatística da análise. Um dos procedimentos empregados para se ter maior representatividade, por muitas vezes, compreende a classificação da amostra por intervalo granulométrico; no entanto este procedimento pode interferir diretamente nos resultados de parâmetros morfológicos.

A tendência atual na caracterização dos parâmetros geométricos de partículas são os sistemas de análise de imagens por fluxo dinâmico, cujos métodos

são descritos pela norma internacional ISO 13322-2/06 (ISO, 2006). Estes foram introduzidos recentemente no mercado e possibilitam a análise de dezenas de milhares de partículas em um amplo espectro de tamanho (de micrometros até 20 a 30 milímetros) sem prévia classificação granulométrica. É possível a determinação simultânea da distribuição de tamanho e forma de materiais particulados, tanto em meio seco como em suspensão.

Tal mecanismo propicia análises com elevada estatística de partículas (KOHLER e LIST, 2005) e eliminação do viés de orientação preferencial (aleatoriedade das partículas no fluxo), propiciando uma significativa agilidade no tempo de resposta (imagens sequenciais coletadas em ordem de nanosegundos) e grande reprodutibilidade (MILLER e HENDERSON, 2010).

Há no mercado quatro equipamentos de análise de imagens por fluxo de partículas: QICPIC (Sympatec⁵), Camsizer (Retsch Technology⁶), CPA (Haver & Boecker⁷) e RapidVue (Beckman Coulter⁸). Estes são semelhantes na medida em que fazem a aquisição das imagens das partículas, mas diferem na forma de apresentação da amostra, configuração das câmeras e no processamento dos dados.

2.4.3 Composição química e mineralógica

Estudos de caracterização de agregados reciclados focados em sua composição química e mineralógica são descritos na literatura por alguns autores (MUELLER, 2003; BIANCHINI, MARROCCHINO *et al.*, 2005; LIMBACHIYA, MARROCCHINO *et al.*, 2007; ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009). O melhor entendimento da composição química e mineralógica dos agregados reciclados e sua influência no desempenho dos materiais de construção podem levar à utilização confiável deste material em aplicações de maior valor agregado (LIMBACHIYA, MARROCCHINO *et al.*, 2007).

⁵ <http://www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/QICPIC.html>

⁶ <http://www.retsch-technology.com/rt/products/digital-image-processing/camsizer/function-features/>

⁷ <http://www.weavingideas.net/us/applications-products/particle-analysis-photo-optical/haver-cpa-models/haver-cpa-3-2.html>

⁸ <http://www.beckmancoulter.com/coultercounter/showDoc/doc.do?filename=&fileid=10124>

O trabalho desenvolvido por Angulo e colaboradores (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009) demonstrou que para agregados graúdos e miúdos, sem carbonatos, a informação da composição química, somada a resultados de análises por termogravimetria e ataque por ácido clorídrico permitem a determinação do teor de pasta de cimento e estimativa do teor de argilominerais (ANGULO, 2005).

Ainda referente à composição química, ressalta-se que a presença de álcalis (Na_2O e K_2O ; principalmente álcalis solúveis expressos em teor equivalente de Na_2O) (LEVY, 2001), pode provocar fissuras na massa endurecida, devido à reação que ocorre entre os álcalis presentes no cimento e alguns minerais presentes no agregado. Devem, portanto, ter seu teor controlado.

As reações entre os álcalis do cimento e a sílica amorfa são denominadas reações álcali-sílica e são as mais rápidas e expansivas; dependem da interação entre os álcalis solúveis do agregado, da proporção de agregados reativos, da umidade e da variação de temperatura do concreto (KYHARA, 1997). Quando os teores de álcalis totais são superiores a 1%, recomenda-se que sejam investigados quanto à sua solubilidade para melhor avaliar o emprego deste como agregado (QUARCIONI, CHOTOLI *et al.*, 2003).

Os íons de cloretos (Cl^-) devem ser também controlados, principalmente para aplicações em concretos estruturais, pois o cloreto é o principal responsável pela corrosão das armaduras e consequente perda de resistência do concreto, afetando sua durabilidade (LEVY, 2001). Os limites máximos variam para as diferentes normas e aplicações, mas em geral são da ordem de 0,1% para concreto não armado e abaixo de 0,05% para concreto armado.

O teor de cloretos em agregados reciclados tende a ser maior do que nos agregados de rocha britados. Alguns autores recomendam que sejam determinados os teores totais de cloretos nos agregados reciclados e não somente cloretos livres, pois o aluminato de cálcio do cimento pode ter formado cloro aluminato de cálcio hidratado, reduzindo, portanto, o teor de cloretos livres (JUAN, 2004).

Os sulfatos presentes podem levar à formação de fases expansivas e provocar tensões internas e fissuração dos materiais de natureza cimentícia. Por isso, o teor de sulfato nos agregados reciclados é também controlado e, em geral,

limitado a 1%, segundo as normas NEN 5905 - da Holanda (DIN 4226-100), da Alemanha e a norma brasileira (ABNT, 2004).

Técnicas de análises químicas instrumentais são apresentadas por diversos autores (EWING, 1972; DUTRA e GOMES, 1984; WILLIAMS, 1996). Dentre as técnicas conhecidas, as mais usualmente empregadas e aplicadas ao material geológico são espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), espectrofotometria de absorção atômica (AAS) e espectrometria de emissão atômica por plasma de acoplamento indutivo (ICP-OES). Uma análise comparativa dos vários métodos instrumentais é apresentada por Dutra e Gomes (DUTRA e GOMES, 1984).

A caracterização das associações mineralógicas é um recurso essencial para a identificação dos constituintes e determinação de suas propriedades. Os recursos que possibilitam a quantificação das espécies minerais, viabilizando a determinação da composição mineral e do grau de liberação da fase de interesse são essenciais na caracterização tecnológica (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997).

A identificação dos minerais que constituem uma amostra normalmente não é possível por meio de apenas uma técnica analítica, sendo comum a conjugação de duas ou mais (op. cit.), sendo os principais métodos: difratometria de raios X (CULLITY, 1978; FORMOSO, 1984), microscopia óptica (PETRUK, 2000), microscopia eletrônica de varredura (GOLDSTEIN, NEWBURY *et al.*, 1992) e cálculos estequiométricos em função da composição química, dentre outros.

A aplicação da difratometria de raios X na caracterização de agregados reciclados é mencionada por alguns autores para a determinação das principais fases presentes, especialmente quartzo, feldspato, calcita (pasta de cimento+calcita) e mica (BIANCHINI, MARROCCHINO *et al.*, 2005; LIMBACHIYA, MARROCCHINO *et al.*, 2007; ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009).

2.4.4 Teor de pasta de cimento

O conteúdo de pasta de cimento remanescente de construções anteriores é o que origina os maiores problemas em agregados reciclados (BARRA e VAZQUEZ, 1998; DE JUAN e GUTIERREZ, 2009): alta porosidade e absorção de água, elevado

índice de abrasão Los Angeles e maiores teores de sulfato. Do ponto de vista mecânico, afeta também a elasticidade, a durabilidade e a resistência à compressão.

Não existem métodos normatizados para determinação do teor de pasta de cimento em agregados reciclados; o procedimento descrito na literatura consiste em reagir o agregado reciclado com uma solução de ácido clorídrico (NISHBAYASHI e YAMURA, 1988; YAGISHITA, F, SANO, M *et al.*, 1994; QUARCIONI e CINCOTTO, 2006). A pasta de cimento e os carbonatos reagem com o ácido; os materiais não solúveis ao ácido, tais como as rochas, cerâmicas, argilominerais e micas constituem o resíduo insolúvel (GRIM, 1953; STEEN e BORG, 2002).

O método descrito por Quarcioni, que envolve o ataque ácido com concentração de 33% de HCl (QUARCIONI e CINCOTTO, 2006), foi aplicado e discutido por Angulo e colaboradores (ANGULO, 2005; ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009) para determinação do teor de pasta de cimento em agregados reciclados de diferentes origens. Como resultado da pesquisa demonstrou-se também que o teor de pasta de cimento pode ser estimado pela soma dos teores de CaO com a perda do fogo (PF) a 1.050°C (op. cit.).

No entanto, tanto o ataque ácido quanto a soma CaO+PF, são procedimentos restritivos quando há presença de agregados calcários. Os carbonatos são solubilizados pelo HCl e aumentam os teores de CaO e também da PF no agregado reciclado, de modo a superestimar o conteúdo de pasta de cimento presente.

2.4.5 Absorção de água e porosidade

A absorção de água é provavelmente o parâmetro mais discutido em se tratando de agregados reciclados visto que afeta a trabalhabilidade dos concretos (POON, SHUI, LAM *et al.*, 2004), suas propriedades mecânicas (GOMEZ-SOBERON, 2002) e durabilidade (LEVY e HELENE, 2004). É a propriedade física que mais diferencia agregados naturais de reciclados (HANSEN, 1986; KOBAYASHI e KAWANO, 1988; LAMOND, CAMPBELL *et al.*, 2002) e está diretamente relacionada à porosidade do agregado reciclado devido ao teor de pasta de cimento aderida (LO, GAO *et al.*, 1999; CHEN, YEN *et al.*, 2003) e à porosidade da própria pasta de cimento (PEDROZO, LEITE *et al.*, 2000).

A correta determinação desses parâmetros em agregados reciclados é fundamental para avaliação da qualidade destes, haja vista que a resistência mecânica de um sólido é inversamente proporcional à sua porosidade (VAN VLACK, 1970; CALLISTER, 2000). Somado a isso, os agregados ocupam cerca de 70 a 75% do volume do concreto e, portanto, sua porosidade tem influência direta no desempenho mecânico dos concretos, conforme demonstrado por Carrijo (CARRIJO, 2005).

A absorção de água dos agregados reciclados é o parâmetro de maior controle segundo normas internacionais e que determina a sua utilização; referem-se essencialmente aos agregados graúdos. Segundo normas coreanas, os agregados graúdos reciclados podem ser classificados em três classes: I, II e III, com valores de absorção de água, respectivamente, de até 3%, 5% e 7%. A classe I é recomendada para uso em concreto estrutural, a classe II para concreto não estrutural, e a classe III para concreto não estrutural e material para base de pavimentos (YANG, CHUNG *et al.*, 2008). Já os miúdos são divididos nas classes I e II, com absorção de até 5% e 7%.

As recomendações da RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*) aceitam a utilização de agregados reciclados com absorção de água de até 10% em concretos com resistência máxima de 50 MPa. As normas japonesas são mais restritivas e fixam em 7% a absorção máxima permitida para uso em concretos de até 24 MPa (JUAN, 2004).

A determinação da absorção de água segundo as normas brasileiras e internacionais NM 30, NM 53 e BSI-BS 812 (ABNT, 1987; BSI, 1990; ABNT, 2001) seguem procedimentos similares, os quais envolvem a determinação da massa seca do agregado (Figura 2.7a), saturada com água livre (Figura 2.7b) e na condição do agregado saturado com superfície livre (Figura 2.7c).

Figura 2.7 - Condições de umidade de agregados

O método proposto pelas normas apresenta dificuldades na caracterização de agregados reciclados visto que foi desenvolvido para caracterizar agregados naturais de baixa porosidade. Dentre estas citam-se: procedimento demorado (média de 48 h por ensaio), dificuldade de saturação dos poros (LEITE, 2001), desagregação do material (CARRIJO, 2005) e, principalmente, imprecisão na determinação da condição de superfície saturada seca.

A massa específica aparente (MEA) é um parâmetro utilizado para a determinação da porosidade dos agregados reciclados, juntamente com a massa específica real (MER), facilmente determinada por picnometria. Logo, a determinação da porosidade enfrenta também as imprecisões e dificuldades referentes às medidas da massa na condição de superfície saturada seca ($\text{Porosidade} = 1 - \text{MEA}/\text{MER}$).

Tais dificuldades, somadas às imprecisões das medidas e dificuldades em obter resultados repetitivos, têm levado pesquisadores a desenvolver métodos alternativos para as medidas de absorção de água (LEITE, 2001; DIAS e AGOPYAN, 2005; KROPP, 2005; DAMINELLI, 2007; TAM, GAO *et al.*, 2008). Destes, destaca-se o procedimento elaborado por Daminelli (DAMINELLI, 2007), que permite maior agilidade nos ensaios e maior repetitividade de resultados.

A determinação da porosidade, alternativamente às técnicas convencionais de caracterização de agregados, pode ser realizada por porosimetria com intrusão

⁹ Imagens de: http://training.ce.washington.edu/pgi/Modules/03_materials/03-2_body.htm

de mercúrio. Embora pouco aplicada a agregados reciclados, é a técnica mais importante para a determinação de porosidade de materiais (WEBB, P.A. e ORR, C., 1997). Em uma única medida de duração geralmente inferior a 60 minutos é possível determinar a porosidade da amostra, a distribuição do tamanho de poros, do volume total de poros e da área específica do material (op. cit.).

Esta técnica é mencionada por Poon (POON, SHUI, LAM *et al.*, 2004) na comparação de agregados naturais, agregados reciclados de concreto convencional e agregados reciclados de concreto de alto desempenho. Os resultados comprovaram que agregados reciclados de concretos de alto desempenho apresentam porosidade intermediária (cerca de 7%), entre a porosidade dos agregados naturais (1,6%) e dos reciclados de concreto convencional (quase 17%), confirmando que a qualidade da pasta de cimento presente no agregado reciclado depende das características do resíduo processado.

2.4.6 Caracterização das associações das fases e separabilidade

A caracterização das associações e a quantificação das fases são de fundamental importância para o processamento de diversas matérias-primas minerais (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982; FANDRICH, GU *et al.*, 2007), visando ao melhor entendimento do comportamento do minério frente às operações de lavra e beneficiamento (JONES, 1987; PETRUK, 2000), bem como para o controle da eficiência dos processos e garantia da qualidade de produtos finais (JONES, 1987).

O beneficiamento mineral visa à separação entre os minerais de interesse e os de ganga, usualmente por meio de propriedades físicas ou físico-químicas diferenciadoras. Para que a separação proceda faz-se necessário que os grãos minerais estejam individualizados o suficiente para que as propriedades diferenciadoras sejam reveladas (GAUDIN, 1932; BARBERY, 1991). Esta propriedade é avaliada através do grau de liberação, parâmetro que retrata a razão entre a fase de interesse individualizada e o total presente. Assim, o grau de liberação mineral é determinante para a avaliação da concentração das fases de interesse e da eficiência dos processos de separação.

A caracterização de associações e quantificação de fases pode ser efetuada diretamente por meio de microscopia óptica (JONES, 1987; SANT'AGOSTINHO e

KAHN, 1997) ou em métodos semi-automatizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estes métodos são morosos, dispendiosos e muitas vezes apresentam resultados semi-quantitativos, dada a baixa representatividade estatística (FANDRICH, GU *et al.*, 2007).

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 de imagem por feixe de elétrons) veio minimizar estas dificuldades com aos primeiros trabalhos realizados em meados da década de 1990 (PETRUK, 1989; PETRUK, 1990; SUTHERLAND e GOTTLIEB, 1991; LASTRA e PETRUK, 1998; FANDRICH, GU *et al.*, 2007).

A este sistema denominou-se "análise de imagens automatizada", que tem por premissa a diferenciação entre os números atômicos das fases presentes, observada em imagem de elétrons retro espalhados ao MEV (contraste de número atômico), aliada à informação química, obtida por meio de um espectrômetro de raios X por EDS (contagens ou imagem de mapeamentos elementar; (CHAUVIN, 1985; PETRUK, 1989; PETRUK, 1990; KAHN, MANO *et al.*, 2002). A associação de informações de raios X permite a discriminação complementar de fases com base em composição elementar determinada pelos raios X característicos (GOLDSTEIN, NEWBURY *et al.*, 1992).

Estas várias opções foram inicialmente exploradas através de sistemas comerciais de análise de imagens integrados a MEV/EDS (PETRUK, 1989; PETRUK, 1990). Desde então, estes sistemas evoluíram de maneira substancial, gerando resultados estatisticamente mais confiáveis e precisos e em tempos cada vez menores (SUTHERLAND e GOTTLIEB, 1991; FANDRICH, GU *et al.*, 2007). Atualmente, os dois sistemas de análise de imagens automatizada por feixe de elétrons acoplados a MEV (QEMSCAN e MLA) são de propriedade da FEI (*FEI Company*) e estão em processo de migração para um produto híbrido.

Os resultados gerados permitem a determinação da composição mineralógica da amostra, grau de liberação do mineral de interesse, detalhes das associações de cada mineral em partículas mistas, distribuição dos elementos de interesse nos minerais portadores, distribuição de tamanho de partículas e forma das fases de interesse, dentre outras informações.

Alternativamente à caracterização direta de associações de fases, estas também podem ser avaliadas indiretamente através de estudos de separabilidade. Estes consideram as diferenças entre as propriedades físicas dos constituintes do material em estudo, sendo a densidade e a susceptibilidade magnética as mais relevantes na indústria mineral (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982; BURT, 1984; JONES, 1987; SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997; FANDRICH, GU *et al.*, 2007).

Estudos de separabilidade mineral permitem avaliar o comportamento do material frente à propriedade física considerada segundo os resultados de distribuição em massa, teores e distribuições de elementos/compostos de interesse. Tem-se, portanto, uma ferramenta que permite auxiliar na predição do comportamento do material frente ao processo de beneficiamento, de estimativas de recuperação e da qualidade de produtos passíveis de serem gerados (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982; BURT, 1984; FANDRICH, GU *et al.*, 2007).

Segundo Burt (BURT, 1984), a separação mineral em frações de densidade distintas é uma das técnicas de separações em escalada de laboratório mais utilizadas. Esta se baseia na capacidade ou não de sedimentação das partículas quando imersas em líquido de uma dada densidade (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997), sendo que em função da granulação do material esta pode ser feita de três maneiras (BROWING, 1961; PARFENOFF, POMEROL *et al.*, 1970): em béqueres, em funis de separação e em centrífuga.

A utilização de líquidos orgânicos¹⁰ com densidades de 1,6 até 4,3 g/cm³ é técnica largamente mais utilizada. Frente a sua toxicidade, estes têm sido substituídos por soluções de sais de tungstênio solúveis em água (LST, LTM, SPT¹¹). Densidades superiores podem ser alcançadas com suspensões densas, compostas de materiais densos micronizados, as quais, entretanto, apresentam problemas de estabilidade e têm uso menos difundido, ou mesmo mediante separação com fluídos paramagnéticos.

¹⁰ Líquidos orgânicos densos mais utilizados: bromofórmio (CHBr_3 - 2,89 g/cm³), tetrabrometano - TBE ($\text{CHBr}_2\text{CHBr}_2$ - 2,96 g/cm³) e di-iodeto de metileno (CH_2I_2 - 3,32 g/cm³).

¹¹ www.chem.com.au

Separações por fluxo de água ascendente são também empregadas em estudos de separabilidade por densidade. A elutriação é a alternativa mais simples aos ensaios convencionais de afunda-flutua - baseada em um equipamento relativamente simples e de fácil operação. Neste processo, o tamanho da partícula exerce grande influência na separação, de modo que a amostra deve ser fracionada em intervalos de granulometria bastante estreitos (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Dentro do elutriador a amostra sofre segregação de acordo com a velocidade de sedimentação das partículas, de forma que as partículas com menor velocidade de fluidização (mais leves ou placoides) serão carregadas pelo fluido ascendente; a esse produto dá-se a denominação "*overflow*", flutuado ou leve. Por outro lado, partículas com maior velocidade de fluidização não serão arrastadas pelo fluido, concentrando-se na porção inferior da coluna, formando o "*underflow*", afundado ou pesado (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Separações magnéticas são realizadas quando as fases que se deseja separar apresentam diferentes susceptibilidades magnéticas (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b). Em estudos de caracterização, a separação magnética é realizada em diferentes intensidades de campo a fim de promover o fracionamento da amostra em vários produtos (JONES, 1987)

Na caracterização tecnológica é tradicional o uso de separadores Frantz, dado seu desempenho otimizado e grande flexibilidade operacional (PARFENOFF, POMEROL *et al.*, 1970; SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997). Os ajustes possíveis são: corrente da bobina que gera o campo magnético (amperagem), inclinação longitudinal da calha por onde passa o material (que controla o tempo de ação do campo sobre a partícula) e a inclinação transversal. Dessa forma é possível determinar uma condição de operação para separações mais seletivas, principalmente quando envolvem materiais com susceptibilidades magnéticas muito próximas.

Existem dois modelos básicos de separadores Frantz: isodinâmico e de barreiras. O Frantz isodinâmico mantém a força magnética sobre as partículas constante ao longo de toda a zona de separação, possibilitando a separação de minerais com susceptibilidade magnética de $0,2 \times 10^{-6}$ a 600×10^{-6} (grandeza

adimensional - quociente de magnetização e intensidade de campo) e granulometria entre 0,60 e 0,04 mm. Embora apresente elevada eficiência na separação, não permite taxas de alimentação altas, sendo ideal para separações de até 50 gramas (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997).

O Frantz de barreiras apresenta desenho e características de operação similares ao modelo isodinâmico, porém com diferente arranjo para geração do campo magnético, o que lhe confere um gradiente de campo mais elevado. Esta característica possibilita a separação em faixas de susceptibilidade mais amplas, com maior capacidade de alimentação para desempenhos similares e faixa granulométrica entre 2 e 0,01 mm (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997).

A separação magnética de agregados de RCD foi avaliada por Xing para amostras artificiais compostas de argamassa (material cimentício) e materiais cerâmicos em diferentes proporções (50:50; 30:70; 70:30). Os estudos foram conduzidos em Frantz isodinâmico na fração entre 2,36 e 0,15 mm, com o objetivo de separar a argamassa com teor de Fe_2O_3 inferior a 1,25% do material cerâmico que apresenta teores de 3 a 4%. Os resultados demonstraram elevada eficiência na separação, sendo a condição ótima de operação: ângulo de 15° e corrente de 1,2A (XING, 2002; XING, FRAAIJ *et al.*, 2004).

Em se tratando de agregados reciclados a partir de RCD, os poucos estudos de caracterização microestrutural disponíveis na literatura focam a análise da zona de transição entre o agregado e a pasta cimentícia (LI, XIE *et al.*, 2001; POON, SHUI e LAM, 2004; TAM, GAO *et al.*, 2005; ETXEBERRIA, VAZQUEZ *et al.*, 2007) ou as microfissuras introduzidas nos agregados após as sucessivas etapas de cominuição (NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2004).

Não se tem conhecimento da aplicação de mineralogia quantitativa na avaliação da eficiência dos processos de produção e concentração dos agregados reciclados.

A separação em líquidos densos foi proposta como uma ferramenta valiosa na caracterização de agregados reciclados (ULSEN, 2006), visto que está diretamente correlacionada à porosidade dos agregados reciclados e, portanto, à sua massa específica aparente (ANGULO, 2005). Isso ocorre porque a massa

específica real dos agregados reciclados, determinada por picnometria da amostra pulverizada, é constante e a massa específica aparente (MEA) é influenciada pelos vazios (poros), demonstrando que a porosidade está diretamente relacionada à MEA.

2.5 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS APLICADAS À RECICLAGEM DE RCD

As operações de tratamento de minérios baseiam-se essencialmente na separação física de partículas com diferentes composições ou tamanhos, ao se submeter uma população de partículas a determinados equipamentos denominados "separadores". Uma força externa é aplicada às partículas, as quais respondem de maneiras diferentes em função de sua composição e/ou granulometria (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982).

Simplificadamente, a separação depende de três fatores: as propriedades dos minerais ou fases presentes, as características do separador e os teores dos produtos que se deseja obter (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982). A escolha do método ou conjugação deles deve, portanto, ser baseada na propriedade diferenciadora dentre as fases presentes e na eficiência da operação (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997).

Como premissa para a eficiência nas operações de tratamento de minérios são necessárias duas condições: liberação e separação, sendo que a segunda é impraticável se a primeira não for bem sucedida (GAUDIN, 1932). O processamento consiste, portanto, em uma etapa inicial de cominuição para promover a liberação entre as fases e para adequação da granulometria para as etapas subsequentes, seguido da concentração propriamente dita.

2.5.1 Britagem e peneiramento

A britagem é a primeira etapa de cominuição na qual o principal objetivo é promover a liberação entre as fases (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b), por meio de forças de compressão, impacto ou cisalhamento (CHAVES e PERES, 2006).

O mecanismo de britagem e o diâmetro dos agregados reciclados têm uma influência direta e marcante na quantidade de pasta de cimento aderida, na forma e textura dos agregados reciclados, sendo, portanto, uma etapa essencial e decisiva para a reciclagem de RCD (NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2004; ETXEBERRIA, VAZQUEZ *et al.*, 2007).

O número de estágios de britagem ao qual o material é submetido é determinante para redução no teor de pasta cimentícia remanescente no agregado (YAGISHITA, F., SANO, M. *et al.*, 1994; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2000b; NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2004). No entanto, o aumento do número de estágios de britagem encarece a produção, aumenta a proporção de finos gerados e pode introduzir fissuras nos agregados naturais (NAGATAKI, GOKCE *et al.*, 2004).

A seleção dos equipamentos de britagem para o processamento de RCD é discutida por poucos autores. Etxeberria (ETXEBERRIA, VAZQUEZ *et al.*, 2007) concluiu que "concretos britados por máquinas de impacto geram elevada proporção de agregados livres de argamassa"; no entanto, não apresenta dados comparativos entre outros métodos de britagem. Tomas (TOMAS, SCHREIER *et al.*, 1999) avaliou os processos de britagem por impacto para promover fraturas intergranulares e a liberação da pasta de cimento, mostrando eficiência nas frações compreendidas entre 2 a 16 mm.

Gress e colaboradores (GRESS, SNYDER *et al.*, 2009) afirmaram que britadores de mandíbulas tendem a deixar maiores teores de pasta de cimento aderida aos agregados reciclados, enquanto que britadores de impacto e cônico são mais eficientes na remoção da pasta aderida, porém não são apresentados resultados de caracterização que fundamentem a afirmação acima.

Para Tomosawa (TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005) a britagem primária de resíduos de concreto pode ser realizada em britadores de mandíbulas sem preocupação com a qualidade do produto final. Britadores de impacto são utilizados para britagem secundária e terciária para produção de agregados de baixa e média qualidade.

O estudo desenvolvido por Tseng (TSENG, 2010) avaliou as características de agregados graúdos produzidos a partir da britagem de pavimentos de concreto

em dois estágios de britagem, sendo mandíbulas+mandíbulas e mandíbulas+impacto. A grande semelhança nos parâmetros caracterizados (forma das partículas, distribuição granulométrica, abrasão Los Angeles, absorção de água e composição granuloquímica) não justifica a indicação de um ou outro equipamento.

Essa conclusão é concordante com as de Wilson (WILSON, 1996), que afirma que a escolha do britador depende acima de tudo das dimensões das partículas na alimentação, do produto que se deseja obter, dos custos operacionais e considerações ambientais. Confirma que a utilização de dois estágios de britagem é mais comum em usinas Européias, e que a escolha do britador secundário é efetuada com base nas preferências de quem o especifica, e não por critérios objetivos de vantagens ou desvantagens (taxa de redução, geração de finos e custo por tonelada produzida).

Outros autores avaliaram a liberação das rochas e argamassa através da cominuição por descarga elétrica (LINSS e MUELLER, 2004). Kiss e Schonert (KISS e SCHONERT, 1980) avaliaram o efeito da liberação da pasta de cimento por britagem de mandíbulas ou impacto através de esferas de quartzo e cimento. Simulações computacionais foram aplicadas por outros autores com o mesmo objetivo (POTAPOV e CAMPBELL, 1994; SCHUBERT, KHANAL *et al.*, 2005; LEE, KWON *et al.*, 2008).

Peneiramento é a operação de separação de uma população de partículas em duas ou mais frações de tamanhos diferentes, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada (CHAVES e PERES, 2006).

Para agregados, assim como para minério de ferro, a distribuição granulométrica é determinante para as aplicações do produto (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b). Agregados graúdos (pedra britada) são comercializados por intervalo granulométrico e os agregados miúdos (areia fluvial ou areia artificial resultante da britagem de rochas) apresentam curvas de distribuição granulométricas recomendadas por normas ABNT (ABNT, 2005a) e normas internacionais (BSI, 2002).

2.5.2 Concentração densitária a úmido

A concentração densitária, gravítica ou gravimétrica, (SAMPAIO e TAVARES, 2005b) pode ser definida como o método de separação de partículas minerais de diferentes massas específicas (TAGGART, 1944). É uma das formas mais antigas de beneficiamento mineral e depende da diferença de densidade entre as partículas que se deseja separar.

A aplicabilidade da separação por densidade pode ser primariamente avaliada pelo "critério de concentração" (Eq. 2.1) estabelecido por Taggart (TAGGART, 1944) e que combina os efeitos das densidades dos minerais constituintes e da densidade do meio. Quanto maior a diferença entre as densidades dos minerais que se deseja separar, maior o critério de concentração e, portanto, mais fácil é a separação (SAMPAIO e TAVARES, 2005a).

$$\text{Critério de concentração} = \left| \frac{\rho_d - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \right| \quad \text{Eq. 2.1}$$

ρ_d - densidade do mineral denso, ρ_f - densidade do meio fluido onde a separação é realizada, ρ_l - densidade do mineral leve

No entanto a dificuldade da separação está principalmente na diferença entre as densidades dos minerais e a densidade do meio na qual é realizada. Pelo critério de concentração de Taggart, a separação é facilitada quando a densidade do meio se aproxima da densidade dos componentes que se deseja separar. Por essa razão, separações pneumáticas, onde o meio é o ar, têm uma aplicação mais limitada (diminui o critério de concentração) e exige uma alimentação com intervalos de tamanhos mais estritos que a separação a úmido (SAMPAIO e TAVARES, 2005a; SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Há uma grande diversidade de equipamentos utilizados na concentração densitária, conforme apresentado detalhadamente por Burt, Sampaio e Tavares, Kelly e Spottiswood, Taggart (TAGGART, 1944; KELLY e SPOTTISWOOD, 1982; BURT, 1984; SAMPAIO e TAVARES, 2005b), dentre outros autores. Destes, o jigue é o principal equipamento empregado no beneficiamento de agregados graúdos reciclados.

A jigagem é um processo de separação hidráulica que consiste na repetida expansão e contração vertical de um leito de partículas pelo movimento pulsante da água (SAMPAIO e TAVARES, 2005b). O resultado é a estratificação do material em camadas ou estratos de densidades crescentes (GAUDIN, 1932; SAMPAIO e TAVARES, 2005b). É tradicionalmente aplicada na indústria mineral na concentração de frações grossas (GAUDIN, 1932), tipicamente acima de 3 mm; no entanto a incorporação da força centrífuga na jigagem (jigues Kelsey e Altair®) melhorou a eficiência do processo na concentração de partículas em granulometrias mais finas (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Em agregados graúdos, a jigagem é utilizada para remoção dos materiais de elevada porosidade (baixa densidade) e elevado teor de pasta de cimento e principalmente de materiais orgânicos e gesso, concentrando dessa forma os agregados de maior densidade. A utilização do jigue na reciclagem é descrita na literatura por diversos autores (KELLERWESSEL, 1993; BREUER, 1997; BUNTENBACH, 1997; JUNGSMANN, DEISL *et al.*, 1997; MESTERS e KURKOMSKI, 1997; MOSKALA e SCHNEIDER-KUHN, 1997; HANISCH, 1998; ANCIA, BOCKMANS *et al.*, 1999; JUNGSMANN e QUINDT, 1999; KOHLER e KURKOWSKI, 2000; XING, 2002).

Outros equipamentos aplicados ao processamento de RCD foram descritos na literatura por Buntenschach (BUNTENBACH, 1997), sendo o Aquamator e o Hydrodrum, exemplificados no APÊNDICE 1.

O *Aquamator* foi desenvolvido na década de 1970 para remoção de materiais orgânicos de agregados, e consiste em um separador de correia hidráulico utilizado para seleção, classificação, lavagem e desaguamento. Por volta dos anos 1980 o equipamento foi instalado em usinas de reciclagem na Holanda e Alemanha, com bons resultados na remoção dos contaminantes leves (BUNTENBACH, 1997).

A alimentação, em polpa, é feita na direção contrária à rotação da correia; os leves são levados pelo fluxo de água gerado pelos sprays e os pesados são levados pela correia, em direção contrária ao fluxo de água. Os finos em suspensão podem contribuir para aumentar a densidade do meio até 1,4 g/cm³, promovendo maior eficiência da separação (BUNTENBACH, 1997).

O *Hydrodrum* é um equipamento descrito na literatura para lavagem do RCD em usinas de reciclagem. Posicionado na horizontal e composto por um tambor cônico com segmentos em forma de espiral e uma câmara de descarga, promove intensa lavagem e atrição dos agregados. Os materiais leves são removidos por um fluxo de água contra-corrente e desaguados por uma peneira, ao passo que os materiais pesados vão até o fim do tambor e são descarregados em rodas-de-caçamba para desaguamento (BUNTENBACH, 1997).

2.5.3 Concentração e classificação pneumática

Embora a separação densitária seja comumente realizada a úmido, há situações em que a separação a seco é mais conveniente, empregando-se o ar como meio de separação (separação pneumática), tais como escassez de água ou degradação do material (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Dentre as vantagens na operação a seco, destaca-se a ausência de bacias de rejeitos e de riscos de poluição de efluentes líquidos da usina, a eliminação das etapas de desaguamento e filtragem dos produtos, as elevadas capacidades de operação, os baixos custos de operação e investimento (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

No entanto, dentre as desvantagens estão a baixa eficiência da separação (SAMPAIO e TAVARES, 2005b) ocasionada pela redução no critério de concentração, tornando a separação mais difícil (TAGGART, 1944) e a sensibilidade frente à umidade superficial do material (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Os princípios da separação pneumática e os principais equipamentos de separação pneumática são apresentados por Sampaio (SAMPAIO e TAVARES, 2005b): jigue pneumático, mesa pneumática, elutriador pneumático, classificador zig-zag e classificadores de velocidade horizontal. As principais aplicações são no beneficiamento de carvões e minérios de areias pesadas e reciclagem de diversos materiais (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Dentro do contexto de reciclagem de RCD, diferentes alternativas de separação pneumática foram avaliadas por pesquisadores da Universidade de Tecnologia de Delft, da Holanda (JONG e FABRIZI, 2004). Na ocasião foram

avaliadas as separações de resíduos mistos de concreto, alvenaria e materiais cerâmicos em jigue pneumático (*Allair, marca Allmineral*), em leito fluidizado de areia seca, em mesa pneumática e em classificador de velocidade horizontal (*separador balístico Aster*). Figuras esquemáticas dos equipamentos mencionados são apresentadas no APÊNDICE 1.

Dos resultados obtidos verificou-se que a separação no jigue, com capacidade de operação de 50 t/m.h de material de 50 a 1 mm, concentra os materiais orgânicos leves no rejeito (madeiras, plástico, alvenaria porosa e gesso). Já separação em leito fluidizado de areia seca pode ser aplicada para materiais de 20 a 50 mm com eficiência comparável à jigagem a úmido, sendo a separação pneumática de maior eficiência.

Na separação em mesa demonstra boa eficiência na separação para alimentações classificadas em faixas granulométricas estreitas; além disso requer alimentações contínuas e uniformes (composição, distribuição granulométrica e umidade) e tem capacidade máxima de 12 t/h.

Por fim, a separação em classificadores de velocidade horizontal apresenta um consumo de energia reduzido dado que a principal força atuante é a gravidade ($<0,1$ kWh), Trata-se do sistema a seco de maior capacidade de operação (> 100 t/h), sendo insensível à umidade da amostra e com eficiência similar à da mesa. Eficiência maior pode ser obtida se o material for previamente classificado em faixas granulométricas estreitas (JONG e FABRIZI, 2004).

Paralelamente, o classificador pneumático Sturtevant foi utilizado na remoção dos finos (abaixo de 0,074 mm) de areias artificiais produzidas a partir da britagem de rochas (CUNHA, ALMEIDA *et al.*, 2004). Os resultados demonstraram que a classificação permite a geração de uma areia dentro das especificações da norma (ABNT, 2005a) com rendimento de até 80%. A classificação é influenciada pela taxa de alimentação e forma das partículas, mas depende sobretudo da posição das palhetas (elementos de rejeição do equipamento). A umidade da alimentação é decisiva na eficiência da separação e deve ser mantida abaixo de 0,5% (CUNHA, ALMEIDA *et al.*, 2004), limitando a aplicação da técnica.

2.5.4 Separação óptica

A separação óptica (*sorting óptico*) manual é o processo original de concentração, tendo sido utilizado desde os tempos mais remotos; sua utilização é estrita dada a necessidade de maiores capacidades de produção e cominuição em granulometrias mais finas (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b).

Equipamentos automatizados de separação óptica foram produzidos a partir da década de 1940 e têm sido principalmente empregados na reciclagem de diversos materiais (plásticos, papéis, cabos elétricos) ou na purificação de materiais de elevado valor agregado (diamante, rubi, esmeralda, ouro e platina). Os equipamentos operam com câmeras CCD de alta capacidade de coleta e imagens e elevada resolução de cores acopladas a sistema de análise de imagens dinâmico com determinação em tempo real de tamanho das partículas, morfologia, cor e posição na esteira. As partículas rejeitadas pelo critério estabelecido são separadas do produto por meio de injeção de ar.

No processamento de agregados reciclados, a separação óptica demonstra elevada eficiência, gerando produtos de alta pureza (JONG e FABRIZI, 2004; MULDER, DE JONG *et al.*, 2007; ANGULO, ULSEN *et al.*, 2011), baixo consumo de energia, baixos custos operacionais e pelo fato de não usar água. As aplicações avaliadas são na remoção de madeira, gesso e vidro em resíduos mistos (JONG e FABRIZI, 2004; MULDER, DE JONG *et al.*, 2007) e na separação entre materiais cerâmicos e cimentícios (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2011).

2.5.5 Método "HRM" - Aquecimento e Atrição

Outros métodos têm investigado processos térmicos para fragilizar a pasta de cimento (KOGA, INOUE *et al.*, 1997; AHN, KIM *et al.*, 2001; SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2005; TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005) que, seguidos de uma etapa de atrição, possibilitam a individualização dos agregados (Figura 2.8a). Este processo foi denominado HRM “heating rubbing method”, que em português poderia ser “método do aquecimento e atrição”.

Shima (SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2005) demonstrou que a temperatura tem o efeito de reduzir a porosidade dos agregados e, portanto, a absorção de água,

e aumentar sua massa específica aparente, sendo a estabilidade do sistema atingido por volta dos 300 a 400°C (Figura 2.8b).

Figura 2.8 – Figura esquemática do efeito do aquecimento e atrição na remoção da pasta de cimento (Nawa¹²) e a influência na massa específica e absorção dos agregados reciclados

O processo HRM foi implementado na usina de reciclagem de concreto Seiyu, em Tóquio para a produção de agregados graúdos de alta qualidade (TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005). Segundo pesquisadores japoneses um dos grandes destaques do método proposto é a possibilidade de utilização dos finos, como estabilizador de solo devido sua elevada capacidade de absorção de água (SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2004) ou na indústria do cimento (SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2005).

O método proposto, segundo estudo sobre o ciclo de vida de CO₂, conduzido por Shima e colaboradores (SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2005), demonstra que apesar das emissões geradas pelo processo de reciclagem HRM, as reduções das distâncias de transporte dos resíduos e a possibilidade de utilização dos finos para as duas opções supracitadas, propiciam uma redução expressiva nas emissões desse gás. Dessa forma, o método proposto é concordante com o protocolo de Kyoto. O autor vai além, demonstrando que a reciclagem de agregados para aplicações convencionais resulta no aumento das emissões de CO₂.

¹² Figura extraída de apresentação conferida por T. Nawa, Hokkaido University (arquivo pessoal).

2.6 PRODUÇÃO DE AGREGADO MIÚDO A PARTIR DE RCD

A britagem do RCD empregada na produção de agregados graúdos reciclados gera uma parcela expressiva de agregados miúdos (cerca de 40% para fração <4,8mm (ULSEN, KAHN *et al.*, 2010).

A utilização desta fração como matéria-prima para a construção tem sido evitada em função da elevada absorção de água e do alto teor de contaminantes e solo (HENDRIKS, 2000b; POON, KOU *et al.*, 2002; RAKSHVIR e BARAI, 2006; ETXEBERRIA, MARI *et al.*, 2007). No entanto, pesquisas recentes evidenciam a importância da aplicação desta fração e demonstram bons resultados (MIRANDA, 2005; POON e CHAN, 2007; SILVA, DE BRITO *et al.*, 2008).

Tecnologias de tratamento de minérios têm sido pouco investigadas para a melhoria de qualidade do agregado miúdo. Hendrix (HENDRIKS, 2004) apresenta alternativas de beneficiamento mineral passíveis de serem aplicadas a agregados graúdos. Para a fração, o autor cita a jigagem na separação de gesso e cerâmica, separação magnética para a remoção de materiais cerâmicos e lavagem com água para remoção de solo e cloretos; nenhuma citação é efetuada para a redução do conteúdo de pasta cimentícia.

O diagnóstico de novas aplicações potenciais para resíduos com diferentes características como matéria-prima para a construção civil, conforme citado anteriormente (MUELLER, 2003; BIANCHINI, MARROCCHINO *et al.*, 2005), passa pelo desenvolvimento de procedimentos de caracterização de agregados reciclados. Para tanto são necessárias algumas etapas:

- Determinação de um ou mais fluxogramas de processo para geração do agregado miúdo, seja unicamente por britagem primária ou secundária, ou considerando um terceiro estágio de britagem;
- Estudos de separabilidade para avaliação do comportamento do material frente a distintas propriedades físicas, particularmente densidade e susceptibilidade magnética, com foco na remoção de pasta cimentícia e cerâmica;
- Desenvolvimento de procedimentos de caracterização dos produtos;

- Avaliação das alternativas de processo mais promissoras sugeridas a partir dos resultados de separabilidade mineral.

2.6.1 Produção de agregados miúdos

A britagem em britador de impacto vertical (VSI¹³ – *Vertical Shaft Impactor*) tem sido muito utilizada como um terceiro estágio de britagem na produção de areia artificial (de pó de pedra), desde os anos 1990. Uma das principais características do equipamento é a geração de impacto de partícula contra partícula, conferindo ao produto elevada taxa de quebra, reduzindo a angulosidade das areias recicladas. As principais vantagens operacionais do VSI são os baixos custos de manutenção, a capacidade de se controlar a granulometria do produto, reduzindo a produção de finos, grande eficiência na liberação e possibilidade de operação com materiais abrasivos (CHAVES e PERES, 2006).

A britagem em VSI gera uma areia artificial com maior esfericidade e relação de aspecto que o pó de pedra gerado por britadores cônicos e giratórios (CUNHA, 2005; BENGTSSON e EVERTSSON, 2006). Conclusões semelhantes foram obtidas da comparação de agregados de gnaiss produzidos por VSI e britador cônico (LINDQVIST, 2008).

Em relação ao consumo de energia demonstrou-se que o VSI consome cerca de metade da energia por tonelada horária produzida (0,79 kW/tph) e com um custo final total de produção cerca de 6% inferior (LINDQVIST, 2008) em relação ao britador cônico. A carga circulante no VSI é mais elevada, o que gera maior atrição entre o material, podendo ser particularmente interessante na remoção da pasta de cimento da superfície dos agregados reciclados.

As variáveis operacionais do VSI são: taxa de alimentação, abertura do regulador de fluxo, efeito cascata e velocidade do rotor. Quanto maior a abertura do rotor, maior a relação de redução e mais fino o produto (CUNHA, 2005). Por outro lado, baixas taxas de alimentação, com pequena abertura do rotor, limitam a

¹³ Em português é também traduzido como *impactador de eixo vertical* ou *moinho autógeno vertical*, embora o termo *britador de impacto vertical* seja o mais utilizado

produção da britagem, resultam em elevado consumo energético específico e geram baixa proporção de impactos secundários na câmara de britagem.

Cunha (CUNHA, 2005) demonstrou que para a produção de areia artificial as melhores condições operacionais em britador VSI, modelo Barmac - Metso, são a taxa de alimentação de 4,1 t/h com regulador de fluxo com abertura de 40 mm, sendo este último um parâmetro que exerce influência marcante no processo, já que maiores aberturas do rotor resultam em relações de redução superiores e baixo consumo energético específico, e maior geração de finos.

Adicionalmente, a velocidade do rotor do VSI é decisiva na distribuição granulométrica dos produtos (CUNHA, 2005; BENGTSSON e EVERTSSON, 2006). Quando a velocidade do rotor é inferior à velocidade ótima, é gerada uma quantidade maior de finos, com morfologia angulosa. Comparando-se a britagem em VSI e cônico verifica-se que o VSI gera um produto com distribuição granulométrica mais fina (LINDQVIST, 2008). Segundo Bengtson e Evertson (BENGTSSON e EVERTSSON, 2008), a velocidade máxima do rotor deve ser de 51 m/s, o que corresponde a 1600-1800 rpm para o equipamento Merlin, escala laboratório com alimentação de 1 a 5 t/h.

A velocidade do rotor também interfere diretamente na morfologia dos agregados produzidos em VSI (BENGTSSON e EVERTSSON, 2006). Para baixas velocidades de rotação, a forma das partículas pode ser pior mais irregular do que dos agregados britados em britadores cônicos. Entretanto, a britagem de agregados em alta rotação leva à produção de agregados com melhor comportamento reológico e menor porosidade, com características similares aos agregados naturais (areia fluvial) (BENGTSSON e EVERTSSON, 2006). O efeito cascata, por sua vez, interfere negativamente na morfologia das partículas (MASS, 1983), gerando um produto com forma mais angulosa.

2.6.2 Processamento de agregado miúdo de RCD

O processamento do agregado miúdo reciclado tem como principais objetivos a adequação do produto frente às aplicações requeridas, destacando-se o ajuste da distribuição granulométrica e da morfologia das partículas e a remoção de fases porosas ricas em pasta de cimento, cerâmica, micas e materiais orgânicos.

2.6.2.1 Remoção da fração leve por concentração densitária

Tal como assinalado anteriormente para agregados graúdos, a concentração densitária também apresenta potencial para remoção de partículas leves presentes nos agregados miúdos.

A seleção dos equipamentos deve ser realizada com base na granulometria do material, na capacidade requerida, na eficiência desejada e no custo. Embora os intervalos granulométricos sejam previamente sugeridos para cada equipamento, os limites reais de aplicabilidade dependem das densidades das fases constituintes e da forma das partículas (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Embora em situação distinta frente às características das fases presentes, pode-se fazer uma analogia com os processos de beneficiamento de areia, nos quais as principais operações unitárias geralmente envolvem remoção da fração fina por classificadores hidráulicos, seguida de concentração em espirais ou mesa vibratória e separações magnéticas para remoção de materiais ferromagnéticos.

A espiral concentradora foi inventada por Ira B. Humphreys em 1941 com o objetivo de concentrar pirita associada a ouro no Colorado. Os avanços tecnológicos envolvem a inovação nos materiais com que são produzidos, a variação dos perfis, diâmetros, passos, sistemas de descarga dos produtos e operação com ou sem água de lavagem (SAMPAIO e TAVARES, 2005b; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b).

A espiral consiste basicamente em uma calha helicoidal contínua, de seção semicircular, suportada por uma coluna central. A separação entre as partículas ocorre pela ação combinada da força gravitacional, centrífuga, de arraste, dispersivas e de atrito, de forma que a segregação de partículas com diferentes tamanhos e densidades ocorra na direção radial da calha (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982; BURT, 1984; SAMPAIO e TAVARES, 2005b; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b).

Dentre os equipamentos de concentração densitária, as espirais apresentam um número limitado de variáveis operacionais: taxa de alimentação, concentração de sólidos, posição dos desviadores de fluxo, tamanho e forma das partículas (SAMPAIO e TAVARES, 2005b). Assim, a escolha da espiral de acordo com o passo, perfil e diâmetro da hélice são fundamentais para o desempenho da

concentração, bem como o ajuste das condições operacionais. A relevância de cada parâmetro construtivo da espiral e das variáveis operacionais são amplamente abordados por Sampaio e Tavares (op. cit.).

Equipamentos baseados em sedimentação retardada (*hindered settling*), conhecidos como hidrosseparadores, têm encontrado cada vez mais aplicações na concentração densitária de minérios pesados e carvões (SAMPAIO e TAVARES, 2005b). Devido à elevada capacidade (até 600 tph) pode substituir diversos bancos de espirais, simplificando o arranjo de equipamentos e a construção das instalações de concentração.

Há alguns modelos de hidrosseparadores disponíveis no mercado (Stokes, allflux® e Floatex® density separator), com diferentes características construtivas e operacionais, sendo o Floatex® o que tem encontrado maior penetração na área de concentração gravítica (SAMPAIO e TAVARES, 2005b). Uma das vantagens é a seletividade na separação e a elevada porcentagem de sólidos no produto afundado (>70% sólidos).

As mesas concentradoras¹⁴ usadas atualmente são baseadas no modelo desenvolvido por Arthur Wilfley em 1895. São constituídas por um "deque" de formato romboidal ou retangular em cuja superfície são dispostos os "rifles ou retentores" (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982; SAMPAIO e TAVARES, 2005b). Existem diferentes tipos de deque e rifles (SAMPAIO e TAVARES, 2005b), no entanto a oscilação da mesa ocorre sempre na direção longitudinal dos rifles enquanto a alimentação ocorre na lateral do deque, no sentido transversal dos rifles.

As oscilações assimétricas permitem o transporte diferencial das partículas no deque permitindo uma separação de elevada eficiência metalúrgica dentre os concentradores densitários (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b). A faixa de variação de tamanho das partículas é de extrema relevância nas separações em mesa concentradora, de modo que é comum em circuitos industriais que esta etapa seja precedida por classificadores e realizada em operações paralelas nos respectivos

¹⁴ Em inglês denomina-se "*shaking table*", Em português são utilizados os termos "*mesa oscilatória ou concentradora*".

circuitos de concentração de grossos, médios e finos (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b).

As mesas concentradoras apresentam um número considerável de variáveis (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982), sejam características construtivas ou variáveis de operação que permitem otimizar a sua operação (SAMPAIO e TAVARES, 2005b). Destas citam-se: frequência e amplitude dos golpes, taxa de alimentação e concentração de sólidos, inclinação do deque, vazão de água de lavagem, dentre outros. As variáveis de operação das mesas são minuciosamente discutidas por Burt (BURT, 1984) e mais recentemente por Sampaio e Tavares (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

2.6.2.2 Separação magnética

Em se considerando a granulometria do agregado miúdo e a susceptibilidade magnética das fases presentes, a remoção de cerâmica vermelha, minerais ferromagnesianos e outras fases portadoras de ferro requer separação magnética de média a alta intensidade. Esta pode ser efetuada a seco em rolos de terras raras (RE-Roll) ou a úmido em alta intensidade de campo (WHIMS - *Wet High Intensity Magnetic Separators*).

O separador de rolos de terras raras (*dry rare earth roll separators* - RE-Roll) permite uma separação com elevada precisão; dentre suas diversas aplicações são utilizados junto a tambores de terras raras na separação de areias pesadas (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b).

O material é alimentado em uma correia que passa por um tambor com imãs de terras raras interiores, cuja rotação, e consequentemente, a velocidade da esteira, pode ser controlada (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006a). A separação ocorre na medida em que as partículas com susceptibilidade magnética crescentes permanecem mais tempo em contato com a esteira, sendo lançadas a distâncias progressivamente menores da descarga dos produtos, possibilitando a separação em dois ou três produtos.

Os separadores WHIMS contínuos apresentaram um grande avanço nas operações de separações magnéticas, pois são mais eficientes na separação de partículas finas do que os separadores a seco (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b).

São constituídos por um anel estacionário e um anel giratório (ou carrossel) onde são instaladas as matrizes ferromagnéticas com abertura selecionadas em função da granulação do material ($<1,2$ mm) e da quantidade relativa de fases magnéticas.

O anel apresenta movimento de rotação entre dois pólos de um eletroímã, de modo a promover a indução eletromagnética na matriz que por sua vez coleta as partículas paramagnéticas (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982); as fases não magnéticas atravessam a matriz sem sofrer perturbações (LUZ, SAMPAIO *et al.*, 2004; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006b) (MULAR, HALBE *et al.*, 2002).

A elevada seletividade da separação deve-se à facilidade no controle das variáveis de operação do equipamento: intensidade de campo, taxa de alimentação, percentagem de sólidos na polpa, velocidade do anel rotativo ou rotor e descarga das partículas magnéticas (LUZ, SAMPAIO *et al.*, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental consistiu em três etapas principais:

- Produção de agregado miúdo reciclado;
- Beneficiamento do agregado reciclado produzido;
- Caracterização dos produtos gerados.

Um fluxograma esquemático das atividades é sumarizado na Figura 3.1 e detalhado nos subitens deste capítulo. Simplificadamente tem-se: amostragem de quatro toneladas de resíduos de construção e demolição seguida de britagem secundária e britagem terciária. Os produtos gerados na britagem terciária foram objeto de estudos de separabilidade em função de densidade e susceptibilidade magnética para avaliação do potencial de remoção das fases enriquecidas em pasta de cimento. A amostra inicialmente coletada e também todos os produtos das separações foram caracterizados.

Produção de agregado miúdo reciclado

Beneficiamento do agregado miúdo reciclado

Figura 3.1 - Fluxograma esquemático do procedimento experimental

3.1 PRODUÇÃO DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.1.1 Amostragem e preparação de amostras

A coleta de resíduos de construção de demolição (RCD) foi realizada na empresa Urbem Tecnologia Ambiental¹⁵, uma usina de processamento de RCD particular, situada no município de São Bernardo do Campo, região metropolitana de São Paulo.

O fluxograma esquemático de operação da usina, com os detalhes dos pontos de amostragem e proporção em volume das alíquotas coletadas, é apresentado na Figura 3.2. Fotografias do local são apresentadas no APÊNDICE 2.

A usina processa essencialmente resíduos de concreto, e em menor escala resíduos de alvenaria (~10% da produção). Os resíduos que chegam à usina são estocados no pátio de recepção de amostras para a remoção manual ("catação") dos contaminantes (aço, madeira, plástico, papel, amianto, gesso e outros). O material removido é comercializado ou encaminhado à destinação adequada (tal como o amianto e o gesso).

O processamento da fração mineral é realizado por meio das seguintes operações unitárias: escalpe dos finos (remoção da fração abaixo de 4,8 mm) por uma grelha, cominuição em britador de impacto (*top-size* de 150 mm), seleção manual para remoção de contaminantes remanescentes, separação magnética (extrator de sucatas metálicas), e peneiramento a seco em peneira de 2 decks (6,3 e 39 mm).

A amostragem foi realizada em dois dias por semana selecionados aleatoriamente, durante 60 dias de produção da usina. A coleta das amostras foi realizada nas pilhas de produtos após o peneiramento e compostos em uma única amostra segundo a proporção em que são gerados (2 partes de material tal qual <4,8; três partes de produto britado <6,3mm; 2 partes de produto britado -38+6,3mm e cinco partes de produto britado -150+38 mm). Ao final foi obtida uma amostra

¹⁵ <http://www.urbem.com.br/principal.htm>.

média, doravante denominada RCD-Urbem, com cerca de 4 toneladas, que foi transportada à Poli-USP para os estudos laboratoriais.

Detalhe da proporção de produtos gerados e amostrados

Produtos	Antes britagem <4,8mm	Após britagem		
		<6,3 mm	6,3-39 mm	39-150 mm
Proporção volume	2	3	2	5

Figura 3.2 - Fluxograma esquemático de processamento e amostragem da usina Urbem

A amostra obtida, RCD-Urbem, foi inicialmente processada em britador de mandíbulas em circuito fechado com peneira para obtenção de agregados abaixo de 19 mm (tamanho máximo da partícula para alimentação da britagem terciária no equipamento utilizado - Barmac 3000). A operação foi realizada em circuito normal, ou seja, britagem seguida de peneiramento (CHAVES e PERES, 2006), tendo-se o cuidado na regulagem da abertura das mandíbulas para evitar a geração excessiva de finos.

A essa operação denominou-se britagem secundária, dado que a britagem primária foi realizada na usina em britador de impacto. Desse modo, o objeto de estudo foi um agregado produzido a partir da britagem de RCD¹⁶ em dois estágios, respectivamente: impacto e mandíbulas. A opção pela britagem secundária em mandíbulas ocorreu devido à maior facilidade de operação deste equipamento no laboratório, possibilidade de regulagem da abertura de mandíbulas e o fato de que estudos anteriores demonstraram que os agregados obtidos na britagem secundária por mandíbulas ou impacto mostram características muito semelhantes (TSENG, 2010)¹⁷.

3.1.2 Processamento de RCD para produção de agregado miúdo reciclado

Uma alíquota da amostra tal qual RCD-Urbem (<19 mm) foi reservada para estudos de caracterização (cerca de 500 kg); o restante (3.500 kg) foi homogeneizado e amostrado em pilha alongada horizontal para obtenção de três alíquotas iguais (cerca de 1.200 kg cada).

Cada uma das alíquotas foi processada separadamente em um britador de impacto vertical (VSI Barmac 3000), com velocidade de rotação do rotor de 55, 65 e 75 m/s, em circuito normal, fechado com peneira de abertura nominal de 3,0 mm¹⁸. Os produtos obtidos foram denominados "areia VSI-55, VSI-65 e VSI-75".

A operação foi conduzida no Centro de Tecnologia de Processos (CTP) da Metso, empresa fabricante do equipamento, localizado em Sorocaba-SP. O esquema de funcionamento do VSI bem como os balanços de massa dos três ensaios realizados e fotografias do local são apresentados no APÊNDICE 4.

As configurações do equipamento nos ensaios realizados são listadas abaixo:

- Equipamento: VSI Barmac 3000

¹⁶ RCD britado, agregados reciclados e agregados britados de RCD são usualmente utilizados como sinônimos para caracterizar o produto da britagem de RCD.

¹⁷ Os resultados do estudo de britagem secundária e caracterização dos produtos foram desenvolvidos por Ulsen, Tseng e colaboradores; os resultados foram incorporados na dissertação de mestrado de Tseng.

¹⁸ A britagem em VSI foi realizada abaixo de 3,0 mm por ser a tela com abertura nominal mais fina então disponível e por ser suficiente para geração de um produto com granulometria de areia.

- Diâmetro do rotor: 300 mm
- Motor: 20 HP
- Velocidade do rotor: 55, 65 e 75 m/s
- Operação: sem cascata
- Circuito: normal, fechado com peneira de abertura 3 mm

O objetivo desta etapa foi avaliar se a britagem por mecanismos de impacto+abrasão é eficiente para a produção de um agregado reciclado com baixo conteúdo de pasta de cimento aderida, sendo uma forma alternativa ao tratamento térmico utilizado em usinas japonesas (SHIMA, TATEYASHIKI *et al.*, 2005; TOMOSAWA, NOGUCHI *et al.*, 2005).

3.1.3 Caracterização da amostra tal qual e do agregado miúdo gerado

Os produtos caracterizados obtidos na produção do agregado miúdo reciclado são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Sumário dos produtos gerados na produção do agregado miúdo reciclado

Identificação	Descrição
RCD-Urbem	Amostra coletada na usina de reciclagem após a britagem primária em britador de impacto, top-size de 150 mm
Tal Qual (TQ)	Produto da britagem secundária em britador de mandíbulas, top-size de 19 mm
TQ-areia	Fração abaixo de 3,0 mm presente na amostra tal qual, ou seja, fração obtida na britagem secundária
VSI-55 VSI-65 VS-75	Produtos da britagem terciária em britador de impacto vertical (VSI) com velocidades do rotor de 55, 65 e 75 m/s, top-size de 3 mm

As caracterizações dos produtos foram conduzidas no Laboratório de Caracterização Tecnológica e no Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP, salvo quando mencionado o contrário, segundo os procedimentos abaixo descritos.

A infra-estrutura utilizada, com fotografias dos equipamentos e figuras esquemáticas, é apresentada no APÊNDICE 4.

Análise granulométrica: realizada por peneiramento a úmido (CHAVES e PERES, 2006) em onze malhas com aberturas nominais de 12,7 a 0,074 mm¹⁹ para a amostra tal qual e em seis malhas entre 2,0 a 0,074 mm para a areia-VSI.

Morfologia de partículas: realizada por análise de imagens dinâmica (WITT, JOACHIM *et al.*, 2008; LIST, KÖHLER *et al.*, 2010) em tempo real conduzida no analisador de tamanho e forma de partículas CAMSIZER, fabricado pela Retsch, com análise de cerca de 1.000.000.000 partículas em poucos minutos. Destaca-se que todos os produtos foram analisados em duplicata, considerando a repetitividade das análises e reprodutibilidade dos dados.

Análise química: análise quantitativa por fração granulométrica por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) a partir de amostras fundidas (DUTRA e GOMES, 1984) com tetraborato de lítio anidro, em espectrômetro de fluorescência de raios X Axios Advance, marca PanAlytical, e determinação da perda ao fogo (ou perda por calcinação) a 1.050° C. As análises químicas foram realizadas segundo os procedimentos usuais empregados no LCT, considerando controle através de análise de amostras em duplicatas e curvas de calibração para análises quantitativas dos dez maiores elementos de rochas estabelecidas a partir de materiais certificados de referência.

Composição mineralógica: por difratometria de raios X (FORMOSO, 1984; BISH e POST, 1989), método do pó, em equipamento Philips MPD 1880, com tubo de cobre (CuK α), 40 kV e 50 mA. As fases minerais foram identificadas através do programa X'Pert Highscore da PanAlytical, utilizando os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007); a estimativa da proporção das fases constituintes foi efetuada pelo método RIR (*Reference Ratio Intensity – análise semi-quantitativa*). A análise mineralógica foi efetuada somente para algumas frações granulométricas ou em produtos selecionados, especialmente onde se nota variação da composição

¹⁹ Malhas com aberturas nominais de: 12,7; 9,5; 6,3; 4,8; 3,3; 2,0; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15; 0,074 mm.

química (composição mineralógica apresenta menor variação do que composição química).

Porosidade: determinada por porosimetria com intrusão de mercúrio (WEBB, PAUL A. e ORR, CLYDE, 1997; WEBB, 2001) em equipamento AutoPore IV 9500, da Micromeritics.

Separações em líquido denso: A caracterização da distribuição dos agregados graúdos (de 19 a 4,8mm) por densidade foi realizada por separação em líquido denso (BURT, 1984) em bromofórmio diluído com álcool etílico nas densidades de 2,2 e 2,5 g/cm³. Nos agregados miúdos da amostra tal qual e da areia-VSI a separação foi efetuada apenas na densidade 2,6 g/cm³ visto que o objetivo foi avaliar a proporção de partículas de reduzida porosidade.

3.2 SEPARABILIDADE POR LÍQUIDO DENSO E CARACTERIZAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES POR MEV-MLA

3.2.1 Estudos de separabilidade por líquido denso

Os estudos de separabilidade por densidade dos agregados miúdos reciclados foram conduzidos por meio de separações sequenciais em líquido denso (BURT, 1984) e limitados às frações granulométricas acima de 0,15 mm da areia VSI-75. Nas frações acima de 0,60 mm as separações foram realizadas em becker e nas frações entre 0,60 e 0,15 em funil de separação tipo pêra ou Squibb (SAMPAIO e TAVARES, 2005b).

Foi utilizado bromofórmio diluído com álcool etílico para ajuste das densidades do líquido em 2,2; 2,5 e 2,6 g/cm³, gerando quatro produtos $d < 2,2$; $2,2 < d < 2,5$; $2,5 < d < 2,6$ e $d > 2,6$.

A caracterização dos produtos foi realizada segundo procedimentos anteriormente descritos no item 3.1.3 - Caracterização da amostra tal qual e do agregado miúdo gerado e compreendeu as seguintes atividades: determinação da composição química por FRX, análise mineralógica por DRX e observações em microscópio estereoscópico para avaliação qualitativa da composição dos produtos e das associações entre pasta de cimento e agregados.

3.2.2 Caracterização da associação das fases por MEV-MLA

A composição das fases presentes e as respectivas associações foram avaliadas por meio de análise de imagens automatizada (FANDRICH, GU *et al.*, 2007). Foi utilizado o software MLA - Mineral Liberation Analyser (FEI) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Quanta 600 FEG (FEI), equipado com sistema de microanálise por EDS Esprit-Quantax 4030 (tecnologia SDD, *silicon drift detector*), marca Bruker.

Foi utilizado o sistema de coleta de imagens de elétrons espalhados (BSE) com discriminação de partículas e posterior coleta de espectros de raios X por EDS no modo GXMAP, um recurso avançado de análise do MLA que permite estabelecer um intervalo de cinza para um mapeamento por composição química em uma malha de pontos uniforme e densa, de modo a discriminar fases cujas tonalidades na imagem de BSE são muito semelhantes.

Após a coleta, foi realizada a classificação das partículas. Os espectros de raios X coletados são sistematicamente comparados com aqueles das fases presentes do banco de dados e os grãos são classificados de acordo com sua equivalência, gerando uma imagem digital da seção onde cada fase individualizada é representada por uma cor. Posteriormente, recursos de análise de imagens disponíveis no software permitem a obtenção de informações sobre as proporções de cada fase e suas respectivas formas de associação e liberação.

O objetivo foi desenvolver um procedimento de caracterização hábil na determinação da composição e das associações das fases presentes nos produtos das separações por líquido denso, bem como avaliar a liberação entre as fases de interesse a pasta de cimento.

Considerando a elevada proporção em massa de material afundado, o produto $d > 2,6 \text{ g/cm}^3$ gerado nos estudos de separabilidade foi novamente submetido à separação em líquido com densidade de $2,64 \text{ g/cm}^3$ (dado que a densidade do quartzo é $2,65 \text{ g/cm}^3$), segundo os mesmos procedimentos anteriormente descritos. Os resultados da caracterização por MEV-MLA são apresentados detalhadamente e comparados com os resultados da caracterização química.

Não se tem conhecimento na literatura de caracterização de agregados reciclados por meio de MEV-MLA, assim, o procedimento desenvolvido para o presente trabalho é descrito com mais detalhes no APÊNDICE 3, assim como as características do equipamento e da rotina estabelecida.

3.3 BENEFICIAMENTO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO

O beneficiamento dos agregados miúdos produzidos a partir de RCD foi realizado para se avaliar a separabilidade entre os agregados naturais (essencialmente quartzo/feldspato) e a pasta de cimento remanescente, com vistas ao desenvolvimento de um processo para produção de agregados miúdos reciclados de baixa porosidade.

Quando pertinente, os estudos foram conduzidos em frações granulométricas estreitas por duas razões principais:

- a) a comercialização de agregados miúdos classificados é uma realidade em usinas de argamassas europeias e uma tendência mundial;
- b) maior eficiência nas etapas de separação e concentração.

Assim, é conveniente que a separação granulométrica anteceda as separações minerais; exceções a este procedimento foram aplicadas às separações em equipamentos contínuos, que tiveram as frações granulométricas compostas em função dos resultados positivos demonstrados por fração granulométrica.

Imagens ilustrativas dos procedimentos e equipamentos empregados estão expostas no APÊNDICE 4.

Um sumário das atividades realizadas nessa etapa e das amostras consideradas é apresentado na Tabela 3.2. Os estudos de remoção da pasta de cimento foram realizados no produto composto pelas amostras VSI-65 e VSI-75 em proporções iguais, doravante denominado VSI 65-75, tendo em vista a semelhança dos produtos obtidos nestas condições de britagem e pela necessidade de maior quantidade de amostra para estudos posteriores de processo. Exceção fez-se às separações magnéticas no separador Frantz de barreiras que foram realizadas no produto VSI-75 por terem se iniciado antes da confirmação da semelhança deste com o VSI-65.

Os estudos por elutriação, mesa oscilatória e RE-Roll foram realizadas nas frações abaixo de 2,0 mm ou 1,2 mm por ineficiência dos equipamentos nas separações das frações mais grossas. Para adequação do tamanho das partículas à separação, estudos complementares foram realizados no produto de britagem das frações acima de 1,2 mm em circuito fechado com peneira para obtenção de todo material abaixo dessa granulação.

Tabela 3.2 - Sumário dos produtos e características dos estudos no agregado miúdo reciclado

Atividade	Produto	Descrição
Atrição	VSI 65-75	Amostra total <3 mm
Elutriação	VSI 65-75	Por fração granulométrica <2,0 mm
Mesa oscilatória	VSI 65-75	Por fração granulométrica <2,0 mm Por fração granulométrica do produto britado <1,2 mm
Espiral	VSI 65-75	Amostra total <3 mm
Frantz	VSI 75	Em produtos da separação por densidade Por fração granulométrica <3,0 mm
RE-Roll	VSI 65-75	Por fração granulométrica e na amostra total entre 3,0 e 0,15 mm Produto britado entre 1,2 e 0,15 mm

3.3.1 Remoção da pasta de cimento por atrição

A remoção seletiva ou liberação entre a pasta de cimento e os agregados naturais (fragmentos de rocha e areia) foi inicialmente avaliada pela britagem terciária em VSI e, posteriormente, por atrição. O trabalho foi efetuado no produto composto VSI 65-75 e teve por objetivo avaliar se a atrição do agregado miúdo reciclado contribui na remoção da pasta de cimento remanescente na superfície destes.

Os ensaios foram conduzidos em uma célula de atrição Denver D12 com capacidade de 1 litro e duas hélices²⁰, presente no Laboratório de Tratamento de

²⁰ Máquina de flotação e atrição D12 (Metso D12 Laboratory Flotation Machine - multi tasking agitator and scubber) - catálogo de equipamentos Metso.

Minérios e Resíduos Industriais (PMI-EPUSP). Foram utilizadas alíquotas com massa entre 450 e 500 g da amostra composta VSI 65-75; as velocidades de rotação da hélice foram de 800, 1.200 e 1.700 rpm, com tempo de atrição de 5, 12 e 20 minutos e porcentagem de sólidos de 45%.

3.3.2 Separabilidade de agregados miúdos reciclados por elutriação

O estudo de separabilidade por elutriação foi realizado no produto composto VSI 65-75. Inicialmente a amostra foi objeto de análise granulométrica por peneiramento a úmido em peneiras com aberturas de 2,0; 1,7; 1,2; 0,84; 0,60; 0,42; 0,30; 0,21 e 0,15 mm para obtenção de produtos em faixas granulométricas estreitas. O estudo foi conduzido separadamente para cada intervalo granulométrico no Laboratório de Caracterização Tecnológica (PMI-EPUSP).

A vazão de água na alimentação foi controlada por rotâmetros e selecionada de modo que a partição entre os produtos leve e pesado fosse da ordem de 20/80%, para densidade de corte próxima a $2,4 \text{ g/cm}^3$ (com base nos resultados de separação em líquidos densos).

Foram utilizados dois elutriadores, os quais foram projetados para que a entrada de água ocorresse por uma coluna externa e concêntrica àquela na qual a separação se procede, de modo a se garantir uma velocidade constante do fluido ascendente. A operação do equipamento foi anteriormente estudada por Higa (HIGA, 2009), tendo sido estabelecidas então as curvas de correlação: velocidade do fluido ascendente x diâmetro médio das partículas x densidade.

O ensaio inicia-se com a abertura da válvula de injeção da água com uma vazão constante, seguida da alimentação cautelosa do material em polpa para que as partículas sejam aleatoriamente dispersas no meio, sem sofrerem interferência umas das outras (arrasto). Este procedimento é decisivo para a eficiência da separação. Ao decorrer do ensaio, as partículas mais leves são carregadas junto com a água em um movimento ascendente e descarregadas por overflow; as partículas mais pesadas acumulam-se na base do equipamento onde são recolhidas separadamente (figura esquemática de operação no APÊNDICE 4).

3.3.3 Concentração de agregados miúdos reciclados em mesa oscilatória

Os estudos de separabilidade de agregados miúdos em mesa oscilatória²¹ foram realizados em mesa Wilfley 13a (deque de 40"x18") do Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTM-EPUSP), na amostra composta VSI 65-75 em duas condições:

- a) *por fração granulométrica*: a amostra foi objeto de análise granulométrica por peneiramento a úmido em peneiras com aberturas de 2,0; 1,2; 0,84; 0,60; 0,42; 0,30; 0,21 e 0,15 mm para obtenção de produtos em faixas granulométricas estreitas. O objetivo foi avaliar a separabilidade por densidade com a mínima interferência do tamanho das partículas.
- b) *produto britado <1,2 mm*: as frações acima de 1,2 mm foram cominuídas em britador de rolos em circuito fechado com peneira até que toda amostra fosse passante na mesma malha. O produto britado foi então peneirado a úmido em peneiras com aberturas de 0,60; 0,30 e 0,15 mm para a geração de três frações a serem ensaiadas.

As principais variáveis da operação são: taxa de alimentação da amostra, concentração de sólidos e vazão da água de lavagem. Tais parâmetros foram ajustados para se obter melhores separações entre a fase leve e a pesada, conforme o tamanho da partícula, objetivando-se uma distribuição de 20 a 40% em massa no leve.

Os ângulos de inclinação lateral e longitudinal foram fixados em 1° e 0,5° e estão em acordo com as recomendações de Burt (BURT, 1984) para concentração de areias em diferentes granulometrias; a amplitude dos golpes foi fixada em 6 mm e a frequência de 558 oscilações por minuto para as frações acima de 0,30 mm e de 480 para as frações mais finas.

²¹ Em inglês denomina-se "shaking table", Em português são utilizados os termos "mesa oscilatória ou mesa concentradora".

A alimentação foi ajustada para 25 a 30 kg/h com porcentagem de sólidos de 15 a 20%, e água de lavagem em torno de 650 l/h, ajustadas conforme a separabilidade do material.

3.3.4 Concentração de agregados miúdos reciclados em espiral

Três alíquotas representativas do produto composto VSI 65-75, com cerca de 200 kg cada, foram processadas em espirais, em três diferentes arranjos. Os ensaios em espirais concentradoras foram conduzidos em laboratório próprio do fabricante dos equipamentos, Akaflex, situado na cidade de São Paulo²².

Foram utilizados dois modelos de espirais com diferentes características construtivas, a LG-7 e a WW-6, e um ciclone de fundo plano para remoção dos finos (abaixo de 0,15 mm) previamente à alimentação do ensaio.

A concentração de sólidos foi fixada em 30% e a taxa de alimentação ajustada visualmente de modo a garantir a distribuição da polpa ao longo do perfil da espiral até formar um leito de estratificação (de 600 a 800 t/h para as diferentes configurações consideradas). O posicionamento dos desviadores foi também regulado visualmente, tal como prática em usinas de concentração de minerais pesados.

No primeiro arranjo, A-1 (Figura 3.3a), o rougher foi realizado na espiral LG-7, na qual foram coletados somente dois produtos: pesado e leve. O pesado rougher passou por uma etapa de limpeza ("cleaner") em espiral WW-6, gerando um produto final (pesado cleaner) e um leve, que foi retroalimentado ao processo. O leve do rougher passou por uma segunda etapa de concentração ("scavenger") em que foram coletados três produtos. Nesse fluxograma o objetivo foi gerar um produto pesado final na etapa cleaner, um ou mais leves na etapa scavenger.

No segundo arranjo, A-2 (Figura 3.3b), o rougher foi também realizado na espiral LG-7, na qual foram coletados três produtos: um pesado final, o misto e o leve. O produto misto passou por uma segunda etapa de concentração (scavenger-1) em espiral LG-7, na qual foram coletados mais três produtos. Já o leve do rougher

²² <http://www.akaflex.com.br/index1.htm>.

passou por uma etapa de limpeza em espiral WW-6 com coleta de somente dois produtos. Nesse fluxograma todos os produtos foram amostrados, a exceção do overflow do ciclone; o objetivo desta operação foi obter um produto pesado final nas etapas rougher e scavenger, produtos leves finais e possíveis produtos pesados finais ou intermediários.

O terceiro arranjo, A-3 (Figura 3.3c) foi muito semelhante ao segundo, como a variação de recirculação do leve da etapa de limpeza do produto misto do rougher (scavenger-1) e do pesado da etapa de limpeza do leve do rougher (scavenger-2). O objetivo desta operação foi a obtenção de um produto pesado final na etapa rougher e um produto leve final na etapa scavenger.

Figura 3.3 - Fluxograma esquemático da separação por espiral concentradora

3.3.5 Separação magnética em separador Frantz

Os estudos de separabilidade dos agregados miúdos reciclados foram conduzidos em alíquotas representativas do produto VSI-75²³, em separador Frantz de barreiras (PARFENOFF, POMEROL *et al.*, 1970; JONES, 1987), do Laboratório de Caracterização Tecnológica (PMI-EPUSP). O objetivo foi avaliar a separabilidade entre as partículas ricas em pasta de cimento e as demais fases presentes nos agregados reciclados.

O procedimento experimental foi realizado em duas etapas:

²³ As atividades referentes à separação magnética tiveram início antes que fosse demonstrada a semelhança dos produtos VSI 65 e 75.

- por densidade
- por fração granulométrica, conforme ilustrado na Figura 3.4 e descrito a seguir.

Figura 3.4 - Procedimento da separação magnética em Frantz de barreiras

Ensaio exploratório por densidade

A separação em Frantz de barreiras nos produtos separados por densidade foi realizada em caráter exploratório a fim de se avaliar o potencial da separação nas fases com maior conteúdo de pasta de cimento.

Inicialmente uma alíquota representativa do produto VSI-75 foi objeto de análise granulométrica por peneiramento a úmido em peneiras com aberturas nominais de 2,0; 1,2; 0,60; 0,30; 0,15 e 0,074 mm. A fração -0,60+0,30 mm foi selecionada e amostrada para ensaios de separação em líquido denso (bromofórmio) nas densidades 2,2; 2,5 e 2,6 g/cm³.

Os produtos obtidos ($d < 2,2$; $2,2 < d < 2,5$; $2,5 < d < 2,6$; $d > 2,6$) foram objeto de separações magnéticas para se avaliar a separabilidade das fases enriquecidas em pasta de cimento (produtos de menor densidade) por susceptibilidade magnética.

Foi utilizado um separador Frantz de barreiras, com inclinação lateral da calha de alimentação de 15° e frontal de 18° com intensidade de correntes de 0 (0,40

kGauss), 0,2 (3,3 kGauss), 0,3 (4,8 kGauss), 0,4 (6,2 kGauss), 0,5 (7,5 kGauss) e 0,6 A (8,9 kGauss)²⁴.

Separabilidade por fração granulométrica

Uma nova alíquota foi amostrada do produto VSI-75, a qual foi peneirada a úmido em peneiras com aberturas nominais de 2,0; 1,2; 0,60; 0,30; 0,15 e 0,074 mm. A separação em Frantz de barreiras foi então realizada para cada intervalo granulométrico.

Cada produto foi alimentado a vazão constante no separador de barreiras, nas mesmas condições anteriormente definidas: inclinação lateral da calha de alimentação de 15° e frontal de 18°. As intensidades de corrente foram de 0,05 (1,1 kGauss), 0,25 (4,0 kGauss), 0,60 A (8,9 kGauss).

As condições operacionais selecionadas são concordantes com os dados avaliados por Xing e colaboradores (XING, HENDRIKS *et al.*, 2004) na avaliação da separabilidade de amostras artificiais compostas em diferentes proporções de material cimentício e de cerâmica. Na ocasião foi utilizado o separador Frantz isodinâmico em granulometrias de 2,36 a 0,15 mm.

3.3.6 Separação magnética em separador de rolos de terras raras RE-Roll

Uma vez verificado o potencial da separabilidade magnética, foram realizadas separações em rolos de terras raras (RE-Roll) em equipamento Inbras, modelo RE-05/04-1, do Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (PMI-EPUSP). O equipamento é constituído por um alimentador vibratório de 10 cm, 4 polegadas e dois divisores ajustáveis que permitem a obtenção de três produtos: magnético, misto e não magnético.

Os ensaios foram conduzidos na amostra composta VSI 65-75, em frações granulométricas da amostra tal qual e também no produto britado, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.5 e descrito a seguir.

²⁴ Os valores correspondentes entre Ampère e kGauss foram obtidos por meio de calibração do equipamento no período de execução dos estudos.

Figura 3.5 - Procedimento da separação magnética em RE-Roll

Por fração granulométrica

A amostra composta VSI 65-75 foi objeto de análise granulométrica por peneiramento a úmido para obtenção de alíquotas a separação em RE-Roll, realizada nas frações $-1,2+0,6$, $-0,6+0,15 \text{ mm}$ e na amostra total $-1,2+0,15 \text{ mm}$.

Produto britado <1,2mm

As frações acima de $1,2 \text{ mm}$ da amostra composta VSI 65-75 foram cominuídas em britador de rolos em circuito fechado com peneira até que toda amostra fosse passante na mesma malha. O produto britado foi então peneirado a úmido em $0,15 \text{ mm}$ para obtenção da fração $-1,2+0,15$ que foi objeto da separação em RE-Roll. A remoção prévia da fração abaixo de $0,15 \text{ mm}$ foi realizada para maior eficiência da separação magnética dada ineficiência do equipamento em partículas dessa granulação e por ser enriquecida em pasta de cimento.

As condições operacionais do RE-Roll para cada produto considerado foram inicialmente avaliadas em alíquotas de 500 a 1.000 g , considerando-se diferentes combinações de rotação dos rolos, taxa de alimentação e posição dos divisores de

produtos. Os resultados preliminares foram comparados aos obtidos na separação em Frantz de barreiras e também analisados por suas características macroscópicas para a definição das condições operacionais a serem empregadas, as quais são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Condições operacionais das separações em Re-Roll

Ensaio, amostra VSI 65-75	Taxa alim. (kg/h.pol)	Rotação (rpm)
-1,2+0,6 mm	14	110
-0,6 +0,15 mm	13	115
-1,2 +0,15 mm	9	100
PB -1,2 +0,15 mm - ensaio 1	6	100
PB -1,2 +0,15 mm - ensaio 2	9	110
PB -1,2 +0,15 mm - ensaio 3	12	115

As separações foram conduzidas conforme fluxograma apresentado na Figura 3.6, em alíquotas da ordem de 3 a 4 kg. Na primeira etapa da separação em RE-Roll (rougher) foram obtidos três produtos: Mag-1, Misto-1 e NMag-1; o produto Misto-1 foi repassado nas mesmas condições inicialmente empregadas, gerando os sub-produtos: Mag-2, Misto-2 e NMag-2. Ao final do ensaio foram obtidos cinco produtos finais: Mag1, NMag1, Mag2, Misto-2 e NMag2.

Figura 3.6 - Fluxograma da separação magnética em RE-Roll

3.3.7 Caracterização dos produtos do beneficiamento

Os produtos gerados nos estudos de beneficiamento do agregado miúdo reciclado foram caracterizados segundo os parâmetros sumarizados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Caracterização dos produtos gerados nos estudos de melhoria da qualidade do agregado miúdo reciclado

Procedimentos de caracterização	Estudos de liberação e separabilidade					
	Atrição	Elutriação	Mesa	Espiral	Frantz	RE-Roll
Análise granulométrica	x	-	x	x	-	-
Estereomicroscopia	x	x	x	-	x	x
FRX	x	x	x	-	x	x
DRX	x	x	x	-	x	x
% afundado 2,6 g/cm ³	-	x	x	-	-	x
Porosimetria Hg	x	x	x	x	x	x
Picnometria água	x	x	x	x	-	-
AI dinâmica	-	-	x	x	-	-

Os procedimentos anteriormente foram anteriormente descritos na seção 3.1.3 - Caracterização da amostra tal qual e do agregado miúdo gerado; análises complementares envolveram:

- a) *Observações ao microscópio estereoscópico*: análise qualitativa da associação entre pasta de cimento e agregados e da rugosidade superficial, em produtos selecionados.
- b) *Picnometria em água*: determinação da massa específica em picnômetro com intrusão de água, em produtos selecionados em sua granulometria tal qual (análises em triplicata). Os resultados destas medidas são particularmente interessantes quando a separação se procede em meio aquoso (elutriação, mesa e espiral) visto que considera a densidade efetiva da partícula porosa em quando em contato com água.

Paralelamente, os produtos da elutriação e das separações sequenciais em líquido denso referentes ao item 3.2.1 foram também analisadas quanto ao teor de pasta de cimento por ataque ácido. O método consiste em estimar o teor de

aglomerantes solúveis por meio da reação de uma alíquota da amostra seca e pulverizada com ácido clorídrico a 33% (QUARCIONI e CINCOTTO, 2006).

O objetivo foi de avaliar a correlação linear entre a soma do teor de CaO com a perda ao fogo e o teor de resíduos solúveis no ácido, tal como apresentado por Angulo e colaboradores (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009) e, desse modo, verificar a legitimidade da utilização da soma de teores de CaO+PF como critério para a estimativa do conteúdo de pasta de cimento.

4 RESULTADOS COMPARATIVOS DA CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA TAL QUAL E DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica da amostra tal qual (TQ, britada abaixo de 19 mm), bem como da fração <3 mm da amostra tal qual (TQ-areia), e da areia-VSI, são apresentadas comparativamente na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Distribuições granulométricas comparativas

A distribuição granulométrica da amostra tal qual indica que a proporção de agregados graúdos (acima de 4,8 mm) e miúdos (abaixo de 4,8 mm) é semelhante: 53% e 47%, respectivamente, sendo que cerca de um quarto da amostra tem dimensão superior a 12,7 mm (25,7%). Por outro lado, a fração abaixo de 0,15 mm corresponde a 6,3% a massa total, sendo 3,9% abaixo de 0,074 mm.

Considerando-se apenas a fração abaixo de 3 mm presente na amostra tal qual (denominada TQ-areia), verifica-se que 15% de sua massa está abaixo de 0,15 mm.

A partição em massa de agregados graúdos e miúdos gerados na britagem do RCD na usina Urbem se assemelha a outros resíduos nacionais de outras localidades, conforme dados de estudo realizado por Ulsen, Kahn e colaboradores (ULSEN, KAHN *et al.*, 2010) ilustrados na Figura 4.2.

IT - Itaquera, IT-C: concreto, IT-V: cerâmico. VI - Vinhedo; CE - concreto de um edifício do Rio de Janeiro, CE-M: britador de mandíbulas; CE-I: britador de impacto; Urbem - usina Urbem na região metropolitana de São Paulo

Figura 4.2 - Distribuições em massa de agregados graúdos e miúdos (ULSEN, KAHN *et al.*, 2010)

Os produtos gerados pelo VSI apresentam distribuições granulométricas muito semelhantes, especialmente nas velocidades de 65 e 75 m/s. O produto VSI-55 apresenta uma distribuição discretamente mais grossa.

Dos gráficos comparativos de distribuição granulométrica, nota-se claramente a semelhança nas curvas dos produtos TQ-areia e da areia-VSI. A proporção em massa de material abaixo de 0,15 mm aumentou de 15% para TQ-areia para 19% a 21% nas areias-VSI, ao passo que a proporção abaixo de 0,074 mm variou de 9% para 11 a 13%, respectivamente. Os resultados demonstram que a britagem terciária reduziu a dimensão máxima característica da amostra de 19 mm para 3 mm com acréscimo de apenas 4 a 5% na proporção de finos, demonstrando a habilidade do VSI no controle sobre a granulometria do produto.

Dessa forma conclui-se que a britagem terciária abaixo de 3 mm gera um produto (areia-VSI) com distribuição granulométrica bastante semelhante à fração areia (<3mm) presente no produto de britagem secundária abaixo de 19 mm (TQ-areia).

4.2 MORFOLOGIA DE PARTÍCULAS

Os resultados da análise da forma das partículas por análise de imagens dinâmica são apresentados em termos da frequência de partículas, valores discretos e acumulados, (Figura 4.3) para as diferentes classes de esfericidade e relação de aspecto²⁵, para as frações acima de 0,60 mm (devido à resolução das câmeras na definição do contorno das partículas – cerca de 20 vezes o tamanho do pixel).

Para as areias do VSI, a velocidade de rotação empregada na britagem teve pouca influência na forma das partículas, haja vista a semelhança nos resultados apresentados.

Por outro lado, a esfericidade e a relação de aspecto das partículas na fração areia presente no produto da britagem secundária (TQ-areia) é significativamente diferente da areia gerada no VSI. Nas amostras geradas pelo VSI têm-se maior frequência de partículas nas classes de esfericidade acima de 0,90 (ou seja, partículas mais esféricas) e também com relação b/l acima de 0,90 (partículas menos alongadas). As diferenças entre as areias do VSI e a areia da amostra TQ são evidentes tanto nas distribuições discretas como nas curvas acumuladas.

Dessa forma, é evidente que o britador de impacto vertical (VSI) gera um produto cujas partículas são mais esféricas e menos alongadas do que a fração areia encontrada no RCD e que a velocidade do rotor não apresentou influência expressiva nessa propriedade entre as distintas amostras de areia-VSI.

²⁵ Esfericidade compreende a relação entre a área da partícula e seu perímetro ($SPHT = 4\pi A/P^2$) e tem valor máximo de 1,0 para uma esfera perfeita. Relação de aspecto (b/l) corresponde a relação entre a menor (b - breadth) e a maior dimensão (l - lenght) da partícula; quanto menor o valor, mais alongada é a partícula.

Figura 4.3 - Análise morfológica de agregados miúdos reciclados, distribuições nas classes de esfericidade e relação de aspecto para as frações acima de 0,60 mm

4.3 ANÁLISE GRANULOQUÍMICA

O sumário da composição química e os teores de aglomerantes por intervalos granulométricos agrupados em função da semelhança de composição química, para a amostra tal qual britada abaixo de 19 mm, para a fração TQ-areia e para as areias do VSI, é exposto na Tabela 4.1. Os resultados da análise granuloquímica para todas as frações são apresentados no APÊNDICE 5.

Tabela 4.1- Análise granuloquímica da amostra TQ-areia e dos produtos do VSI

Fração (mm)	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição (%)				
		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
Tal Qual	100	65,8	8,78	2,90	1,34	2,34	1,58	9,38	6,78	16,2		100	100	100	100	100
-19+2,0	66,4	64,6	9,39	3,06	1,66	2,64	1,66	9,52	6,38	15,9		65,1	71,0	70,1	77,4	65,4
-2,0+0,15	27,3	72,8	6,59	2,26	0,74	1,74	1,25	7,66	6,01	13,7		30,2	20,5	21,3	18,4	23,1
-0,15	6,3	48,8	11,8	3,95	0,61	1,66	2,21	15,4	14,2	29,6		4,7	8,5	8,6	3,9	11,5
TQ-areia	100	67,9	7,79	2,63	0,82	1,85	1,45	9,14	7,44	16,6		100	100	100	100	100
-3,0+2,0	17,6	65,7	8,81	2,87	1,31	2,44	1,52	9,28	6,92	16,2		17,1	19,9	19,2	24,7	17,2
-2,0+0,15	66,9	72,8	6,59	2,26	0,74	1,74	1,25	7,66	6,01	13,7		71,8	56,6	57,6	62,2	55,2
-0,15	15,5	48,8	11,8	3,95	0,61	1,66	2,21	15,4	14,2	29,6		11,1	23,4	23,2	13,1	27,6
VSI-55	100	66,3	8,42	2,78	1,13	2,32	1,35	9,76	7,31	17,1		100	100	100	100	100
-3,0+2,0	29,6	64,4	9,89	2,86	1,77	3,01	1,38	9,17	6,50	15,7		28,8	34,8	30,5	41,1	27,2
-2,0+0,15	51,8	73,2	6,81	2,33	0,86	2,02	1,04	7,54	5,78	13,3		57,2	41,9	43,4	43,4	40,5
-0,15	18,6	50,1	10,6	3,91	0,8	2,1	2,17	16,9	12,9	29,7		14,0	23,3	26,1	15,6	32,4
VSI-65	100	66,4	8,72	2,83	1,22	2,41	1,36	9,81	7,18	17,0		100	100	100	100	100
-3,0+2,0	26,9	64,6	10,57	2,91	1,97	3,05	1,44	9,08	6,27	15,3		26,2	32,6	27,7	37,3	24,3
-2,0+0,15	51,9	74,0	6,93	2,46	0,99	2,14	1,02	7,29	5,30	12,6		57,8	41,2	45,1	44,8	38,4
-0,15	21,2	50,0	10,8	3,64	0,82	2,23	2,09	16,9	13,0	29,9		15,9	26,1	27,2	17,8	37,3
VSI-75	100	66,3	9,05	2,92	1,30	2,49	1,44	9,46	6,97	16,4		100	100	100	100	100
-3,0+2,0	27,2	63,2	11,24	3,19	2,15	3,19	1,64	9,03	6,36	15,4		25,9	33,8	29,6	38,2	25,5
-2,0+0,15	52,1	73,3	7,38	2,48	1,04	2,20	1,09	7,22	5,38	12,6		57,6	42,5	44,3	44,5	40,0
-0,15	20,7	52,8	10,4	3,69	0,86	2,31	2,06	15,7	11,8	27,4		16,5	23,7	26,1	17,2	34,5

Os teores de SiO₂ e da soma Na₂O+K₂O da amostra tal qual são apresentados comparativamente na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Teores dos principais óxidos da amostra tal qual

Para a amostra tal qual, verifica-se três intervalos granulométricos com composições químicas semelhantes, sendo: -19+2,0 mm (66,4% massa),

-2,0+0,15 mm (27,3% massa) e -0,15 mm (6,3% massa). Para as areias (TQ-areia e areias do VSI), os intervalos com composições químicas mais próximas são as seguintes frações: -3,0+2,0 mm, entre 2,0 e 0,15 mm e abaixo de 0,15 mm.

Os principais constituintes das frações acima de 0,15 mm são: sílica, óxido de cálcio, alumina e óxido de ferro que juntamente com a perda ao fogo ultrapassam 90% dos teores nas amostras; elementos menores são Na_2O , K_2O e MgO .

A soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro está relacionada aos silicatos presentes nas rochas, areia e cerâmicas, ao passo que a soma dos teores de CaO com a PF está essencialmente relacionada à pasta de cimento remanescente nos agregados reciclados (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009).

Tanto para a amostra TQ como para as areias, nota-se um aumento nos teores de sílica no intervalo -1,2+0,15 mm, acompanhado pela redução na soma dos teores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$. Esse comportamento pode indicar aumento do conteúdo de areia de quartzo (agregado miúdo) e redução na proporção de fragmentos líticos, fato confirmado pelo empobrecimento de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ na fração (relação teor e distribuição).

Nas frações abaixo de 0,15 mm, o comportamento de todos os produtos difere completamente das demais frações, com redução considerável no teor de sílica e aumento no conteúdo de $\text{CaO}+\text{PF}$.

Dessa forma demonstra-se uma estreita correlação entre a fração granulométrica e a composição química. Mesmo comportamento já foi observado em estudos anteriores (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009) em que se demonstrou que a composição química dos agregados reciclados apresenta uma variação maior por intervalo granulométrico do que em relação à origem do resíduo (RCD de concreto ou misto).

Os teores dos principais constituintes (sílica, alumina, óxidos de ferro e de cálcio e perda ao fogo) são bastante similares a resíduos de diferentes fontes no Estado de São Paulo (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009). Maiores teores de CaO (10-23%) foram observados por Bianchini (BIANCHINI, MARROCCHINO *et al.*, 2005) na Itália, provavelmente devido à presença de agregados calcários. Na Grã-Bretanha, agregados de concreto têm menores teores de alumina (LIMBACHIYA,

MARROCCHINO *et al.*, 2007), o que pode ser atribuído à menor quantidade de cerâmicas mistas ao resíduo.

Análises comparativas do conteúdo e distribuição de CaO+PF para a amostra Tal Qual (TQ) e para os agregados miúdos de RCD, gerados por britagem secundária (TQ-areia) ou terciária (areia-VSI), são apresentadas na Figura 4.5, juntamente com o total em massa retido, para as frações acima de 0,15 mm.

Figura 4.5 - Comparativo entre a proporção em massa, teor e distribuição de CaO+PF

Os resultados comparativos mostram que 88,5% do total de CaO+PF da amostra TQ concentra-se nas frações acima de 0,15 mm, já para o produto TQ-areia essa proporção reduz-se a 72,4%. Nos produtos gerados pelo VSI ocorre sistematicamente uma redução relativa desta proporção, indicando um deslocamento de CaO+PF para as frações mais finas (enriquecimento de CaO+PF nas frações <0,15mm). Na média, a distribuição de CaO+PF para as areias de VSI é de cerca de 65%, acompanhadas por discreto decréscimo nos seus teores.

Os dados comparativos entre as areias do VSI mostram que a velocidade do rotor teve maior influência na redução da pasta porosa quando empregadas as velocidades de 65 e 75 m/s.

A proporção relativa entre o quartzo e os aluminossilicatos oriundos das rochas britadas (principalmente feldspatos) pode ser indicado pela fração entre os teores $\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$, conforme gráficos apresentados na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Proporção relativa entre quartzo e aluminossilicatos a partir da relação $\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$

Os resultados da amostra tal qual (Figura 4.6a) demonstram que há uma tendência ao acréscimo de quartzo, preferencialmente nas frações entre 2,0 e 0,074 mm. Nas areias VSI, o decréscimo da razão $\text{SiO}_2/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ em relação à areia tal qual (Figura 4.6b) deve-se ao enriquecimento dos álcalis oriundos da britagem dos agregados graúdos.

Os resultados comparativos entre as areias do VSI (Figura 4.6b) indicam que a condição operacional empregada na britagem exerce uma influência sutil na proporção entre quartzo e outros silicatos. Para as frações acima de 0,30 mm, demonstra-se que quanto maior a velocidade do rotor do VSI, menor o conteúdo de quartzo e maior a proporção dos outros silicatos (especialmente feldspatos); essa relação é mais evidente para a areia VSI-55 (maior similaridade entre areia VSI-65 e VSI-75).

Por outro lado, nas frações abaixo de 0,30 mm o comportamento entre as areias do VSI é similar, indicando que os feldspatos (essencialmente presente no agregado graúdo) estão concentrados principalmente nas frações mais grossas. Tais considerações indicam uma cominuição seletiva entre a pasta cimentícia (quartzo + cimento) para maiores velocidades do rotor.

Sumariando, o processamento total de RCD para a produção de agregado miúdo reciclado gera uma areia enriquecida em aluminossilicatos, se comparada à

fração areia presente nos agregados da britagem secundária. Além disso, quanto maior a velocidade de rotação empregada no VSI, maior o conteúdo de aluminossilicatos e menor o de pasta cimentícia presente nas frações acima de 0,30 mm.

4.4 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Os difratogramas comparativos entre as frações granulométricas da amostra tal qual, das areias do VSI são apresentados, respectivamente, na Figura 4.7 (TQ, frações -12,7+9,5; -3,36+2,0; -0,60+0,30 e -0,074 mm²⁶), Figura 4.8 (VSI -3,0+2,0 mm) e Figura 4.9 (VSI -0,60+0,30 mm). A composição mineralógica estimada pela intensidade relativa dos picos é exibida na Tabela 4.2.

Figura 4.7 - Difratogramas comparativos de frações granulométricas da amostra tal qual

²⁶ São apresentados apenas difratogramas de raios X de frações granulométricas selecionadas devido à semelhança da composição entre as distintas frações.

Figura 4.8 - Difrátogramas comparativos fração -3,0+2,0 mm das areias do VSI

Figura 4.9 - Difrátogramas comparativos fração -0,60+0,30 mm das areias do VSI

Tabela 4.2 - Estimativa da composição mineralógica por DRX em diferentes frações da amostra tal qual

Produtos / Fração (mm)	Minerais (%)									
	K-Feld.	Na-Feld.	Quartzo	Mica	Caulinita	Gibbsita	Calcita	Dolomita	Anfibólio	
TQ	-12,7+9,5	23	23	21	10	3	pp	12	8	<1
	-3,36+2,0	26	20	21	9	3	pp	14	7	<1
	-0,60+0,30	10	14	35	12	10	<1	16	3	<1
	-0,074	7	9	15	20	10	5	25	7	2
VSI 55	-3,0+2,0	29	31	16	7	pp	-	10	5	2
	-0,6+0,3	15	16	47	10	pp	-	8	4	-
VSI 65	-3,0+2,0	28	36	20	5	pp	-	6	4	1
	-0,6+0,3	18	24	32	13	2	-	8	3	pp
VSI 75	-3,0+2,0	26	33	20	7	pp	-	6	4	2
	-0,6+0,3	16	17	43	13	1	-	7	3	pp

Nota: K-Feld. - ortoclásio/microclínio, Na-Feld. - albita; mica - biotita/muscovita/flogopita

Com relação à amostra tal qual (TQ), verifica-se um comportamento bastante semelhante entre as frações acima de 2 mm, com notória concentração de feldspatos (46% por fração), confirmando os resultados da composição química.

Na fração intermediária (-0,60+0,30 mm) ocorre um decréscimo acentuado nos teores de feldspatos, acompanhado de acréscimos significativos nos teores de quartzo (de cerca de 20 para 35%) e caulinita (de 3 para 10%). O aumento do quartzo é concordante com os resultados de análises químicas (maiores teores de sílica), ao passo que a caulinita pode estar relacionada aos argilominerais presentes em cerâmicas vermelhas calcinada a baixas temperaturas.

Já na fração abaixo de 0,074 mm, ocorre um decréscimo ainda mais marcante nos conteúdos de feldspato (16%) e quartzo (10%), com enriquecimento principalmente de calcita (25%), mica (20%) e gibbsita (5%).

Os teores de calcita estão essencialmente relacionados com a pasta de cimento remanescente nos agregados reciclados e, secundariamente, ao conteúdo de calcita, sendo que por difratometria de raios X não se pode distinguir ambas as fases. Destaca-se que os agregados utilizados na região são tipicamente graníticos, portanto, agregados de calcita, se presentes, devem ser encontrados em pequenas proporções.

A composição mineralógica dos produtos do VSI (Tabela 4.2) confirma o enriquecimento preferencial de feldspatos nas frações mais grossas (Figura 4.8) dos

produtos obtidos em maiores velocidades de rotação, enquanto que a proporção de quartzo e micas é mais elevada nas frações mais finas (Figura 4.9). Os carbonatos concentram-se de forma semelhante para os três produtos do VSI, com discreto aumento na fração mais grossa da areia VSI-55.

4.5 POROSIDADE DOS AGREGADOS MIÚDOS

Os valores comparativos de porosidade determinados por porosimetria ao mercúrio para a fração acima de 0,6 mm dos agregados miúdos reciclados, TQ-areia e VSI-areia, são apresentados na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Porosidade ao mercúrio de agregados miúdos reciclados

A areia produzida pela britagem em VSI apresenta claramente menores porosidades em relação à fração areia da amostra tal qual (cerca de metade). Comparando-se as areias do VSI, as porosidades são bastante semelhantes, com uma discreta redução para os produtos obtidos a maiores rotações, indicando a quebra seletiva de partículas porosas.

A redução na porosidade das areias do VSI é mais expressiva do que a redução nos teores de pasta de cimento ($\text{CaO} + \text{PF}$; Figura 4.5), em comparação à amostra tal qual. Dessa forma, demonstra-se que a britagem apresentou um efeito mais significativo na redução da porosidade total do agregado reciclado do que em

relação à redução do conteúdo de pasta de cimento, ou seja, está promovendo uma fragmentação seletiva da fração mais porosa da pasta, mas não a eliminando na mesma proporção.

4.6 SEPARAÇÃO EM LÍQUIDOS DENSOS

4.6.1 Amostra tal qual

A distribuição em massa da amostra tal qual (TQ <19 mm) nos produtos das separações minerais em líquidos densos, nas densidades 2,2 e 2,5 g/cm³, é apresentada na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Distribuição em massa dos produtos de separação em líquido denso (a) por fração e (b) por intervalo granulométrico - amostra tal qual

Notadamente nas frações granulométricas mais grossas há maior proporção de amostra nos produtos com densidade abaixo de 2,2 g/cm³ (de 20 a 40% nas frações acima de 4,8 mm). Nas frações mais finas ocorre um nítido aumento do conteúdo de materiais com maior densidade (produto afundado em 2,5 g/cm³), ou seja, enriquecimento de fases com menor porosidade.

As distribuições totais calculadas por intervalo granulométrico (Figura 4.11b) evidenciam o distinto comportamento entre os agregados graúdos (acima de 4,8

mm) e as frações mais finas. O material com granulometria entre 1,2 e 0,074 mm destaca-se por apresentar elevada proporção em massa (67%) de material afundado em $2,5 \text{ g/cm}^3$, caracterizado pela presença de partículas de baixa porosidade.

O aumento da distribuição dos produtos nas classes de maior densidade das frações granulométricas mais finas deve-se à liberação das fases minerais em relação à pasta de cimento aderida e a redução dos poros pela diminuição. Essa afirmação é corroborada pela redução da absorção de água, aumento nos teores de sílica e redução nos teores de aglomerantes.

Resultados anteriores obtidos para a fração gráuda de agregados de concreto reciclados de origens e composições distintas (ULSEN, 2006) demonstram que a fração gráuda (+4,8 mm) tem de 30 a 35% no produto $d > 2,5$, superando os valores ora observados para as amostras da Urbem (média de 26%). Já nos produtos na granulometria de areia (-4,8+1,2 mm), a amostra da Urbem apresenta maior proporção de material $d > 2,5$ do que os estudos anteriores demonstraram. No entanto, nas frações mais finas ($< 1,2 \text{ mm}$), a distribuição de massa em $d > 2,5$ é muito semelhante para todas as amostras analisadas e pode, portanto, ser um indicativo de que a liberação da pasta de cimento/agregados abaixo de 1,2 mm ocorre independentemente da origem ou composição do material.

4.6.2 Agregado miúdo da amostra tal qual e produtos do VSI

Dado o aumento na proporção em massa nos produtos com densidade acima de $2,5 \text{ g/cm}^3$ nas frações mais finas, os comparativos das areias foram realizados para a separação em densidades de $2,6 \text{ g/cm}^3$.

Os resultados comparativos das distribuições em massa dos produtos afundados em $2,6 \text{ g/cm}^3$ para os totais calculados dos produtos caracterizados, são apresentados na Figura 4.12a, ao passo que os teores e distribuições de CaO+PF são expressos na Figura 4.12b.

TQ -19+3mm, TQ-areia, VSI-55, VSI-65, VSI-75 -3,0+0,15mm

Figura 4.12 - Porcentagem em massa do produto afundado em 2,6 g/cm³ (a); massa, teor e distribuição de CaO+PF (b)

Os resultados da separação em líquido denso mostram que a amostra cabeça (tal qual) apresenta baixa distribuição de massa no produto pesado, ou seja, são ricas em partículas com elevada porosidade. Os elevados teores de CaO+PF (Figura 4.12b) confirmam que são também ricas em pasta de cimento. Comparativamente, a fração areia da amostra tal qual já apresenta maior parcela em massa no produto pesado e teor significativamente menor de CaO+PF, indicando que nesta fração já ocorre liberação parcial da pasta de cimento dos agregados naturais.

Os resultados para a areia-VSI comparados à areia da amostra tal qual (TQ-areia) demonstram que a liberação da pasta de cimento é favorecida pela cominuição. Paralelamente, o aumento da velocidade do rotor do VSI de 55 para 65 m/s reduz o conteúdo de fases porosas (aumento da proporção em massa no produto pesado), no entanto o aumento de 65 para 75 m/s gera um produto semelhante, tanto em relação à proporção de produto pesado como em termos de teor e distribuição de CaO+PF neste produto.

Adicionalmente, a parcela dos produtos de maior densidade aumenta para as frações mais finas, conforme apresentado na Figura 4.13. Novamente, demonstra-se que a liberação da pasta de cimento ocorre preferencialmente nas frações mais finas, com o decréscimo da proporção de fases porosas.

Figura 4.13 - Distribuição de agregados miúdos reciclados nos produtos de densidade da separação em líquidos densos

4.7 CONCLUSÕES PARCIAIS DA PRODUÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS

A análise granulométrica da amostra tal qual (britada abaixo de 19 mm) mostra que a proporção de agregados miúdos (<4,8 mm) é de cerca de 50%. As análises químicas mostram que a fração graúda (acima de 4,8 mm) tem maior quantidade de pasta de cimento (estimada por CaO+PF) do que a fração fina (abaixo de 4,8 mm e acima de 0,15 mm). Nas frações mais finas (-2,0+0,15 mm) ocorre sistematicamente uma redução no conteúdo de pasta de cimento e uma tendência ao incremento de quartzo (tipicamente abaixo de 2,0 mm e acima de 0,074 mm).

A britagem terciária da amostra tal qual em VSI abaixo de 3 mm mostrou-se eficiente na produção de areia abaixo de 3 mm sem acréscimo na proporção de finos, e com partículas de maior esfericidade do que a areia encontrada no RCD da britagem secundária.

O aumento dos teores de alumina e ferro nos produtos do VSI indica que ocorre incorporação de aluminossilicatos (feldspatos, principalmente) no produto da britagem terciária, confirmado pela difração de raios X, devido à incorporação do agregado graúdo rico em feldspato.

A separação em líquidos densos demonstrou que para a amostra tal qual, o aumento na proporção em massa nos produtos afundados aumenta nas frações granulométricas mais finas. Em relação aos agregados miúdos, verifica-se um aumento de 32 para 55% na distribuição dos produtos afundados em $2,6 \text{ g/cm}^3$. Os resultados permitem concluir que as areias geradas pelo VSI são compostas por partículas de menor porosidade, dado confirmado pelos resultados da porosimetria ao mercúrio e da absorção de água.

Adicionalmente, pode-se inferir que o efeito provocado pelo VSI é mais expressivo na redução da porosidade da pasta de cimento aderida do que propriamente na sua remoção, uma vez que a redução da porosidade das partículas e absorção de água é mais expressiva do que a redução dos teores de $\text{CaO}+\text{PF}$.

Os resultados da caracterização da areia do VSI comparada à areia da amostra tal qual demonstram que a liberação entre a pasta de cimento e os agregados é favorecida pela cominuição. Paralelamente, o aumento da velocidade do rotor do VSI de 55 para 65 m/s reduz o conteúdo de fases porosas (aumento da proporção em massa no produto pesado). No entanto, o aumento de 65 para 75 m/s gera um produto semelhante, tanto em relação à proporção de produto pesado como em termos de teor e distribuição de $\text{CaO}+\text{PF}$ neste produto, porém com maior conteúdo de feldspatos.

Sumarizando, o processamento integral do RCD abaixo de 3,0 mm gera um agregado miúdo com partículas mais arredondadas, com maior conteúdo relativo de aluminossilicatos e menor proporção de porosas, essencialmente representadas pela pasta de cimento.

5 RESULTADOS DA SEPARABILIDADE POR LÍQUIDO DENSO E CARACTERIZAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES POR MEV-MLA

5.1 SEPARABILIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS POR LÍQUIDOS DENSOS

A distribuição em massa, a composição química e distribuição dos principais elementos nos ensaios de separabilidade por líquidos densos para o total calculado do produto VSI-75 no intervalo -3,0+0,15 mm são sumarizados na Tabela 5.1 e na Figura 5.1.

Tabela 5.1 - Sumário dos resultados das separações em líquido denso, total calculado -3,0+0,15 mm

Fração (mm)	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição (%)				
		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	
-3,0+0,15																
d<2,2	5,8	44,2	7,36	2,89	2,32	0,42	1,22	23,3	16,2	39,5	3,7	5,2	5,0	2,5	17,5	
2,2<d<2,5	19,6	59,2	7,08	2,59	1,61	0,58	2,26	14,1	10,4	24,5	17,0	17,1	15,3	14,7	36,9	
2,5<d<2,6	20,7	70,4	9,90	2,49	0,63	1,34	4,45	4,51	3,75	8,26	21,3	25,2	15,4	31,6	13,1	
d>2,6	53,9	73,5	7,93	3,98	1,13	1,80	1,81	4,65	3,21	7,86	58,0	52,5	64,3	51,2	32,5	
Total calc.	100	68,4	8,14	3,34	1,19	1,39	2,41	7,55	5,48	13,0	100	100	100	100	100	
Produtos																
d>2,2	94,2	69,9	8,18	3,36	1,12	1,44	2,48	6,58	4,82	11,4	96,3	94,8	95,0	97,5	82,5	
d>2,5	74,6	72,7	8,47	3,56	0,99	1,67	2,54	4,61	3,36	7,97	79,3	77,7	79,7	82,8	45,6	
d>2,6	53,9	73,5	7,93	3,98	1,13	1,80	1,81	4,65	3,21	7,86	58,0	52,5	64,3	51,2	32,5

Figura 5.1 - Distribuição acumulada das principais fases

Os teores e distribuições de todos os produtos por fração granulométrica são detalhados no APÊNDICE 6, sendo os teores dos principais compostos (SiO₂, Na₂O+K₂O e CaO+PF) mostrados comparativamente na Figura 5.2. A composição mineralógica determinada por difratometria de raios X e imagens representativas dos produtos obtidas por estereomicroscopia são apresentadas, respectivamente, na Figura 5.3 e na Figura 5.4.

Figura 5.2 - Teores dos principais elementos dos produtos de separações em líquidos densos

Figura 5.3 - Difratomogramas comparativos dos produtos da separação em líquido denso, fração -1,2+0,60 mm

Considerando a distribuição em massa nos produtos da separação por densidade, verifica-se que apenas 5,8% da amostra (total composto -3,0+0,15 mm) estão nos produtos com densidade abaixo de 2,2 g/cm³. Este produto é composto essencialmente por partículas de quartzo recobertas por pasta de cimento (Figura 5.4a). O produto entre 2,2 e 2,5 g/cm³, que representa em média 20% da massa da amostra total, é composto essencialmente por fragmentos cerâmicos e partículas de quartzo e feldspato com elevada proporção de pasta cimentícia aderida (Figura 5.4b). Os difratogramas de ambos os produtos são similares com discreto aumento na proporção de quartzo para o produto mais pesado.

Por outro lado, mais de 70% da massa da amostra concentra-se no produto com densidade acima de 2,5 g/cm³. Estes produtos apresentam pequeno conteúdo de fases porosas e são enriquecidos em minerais máficos (biotita-flogopita, piroxênio e anfibólio) e quartzo com baixo teor de pasta de cimento aderida. O produto entre 2,5 e 2,6 g/cm³ (20% em massa) apresenta ainda pequeno conteúdo de partículas cerâmicas, mas destaca-se pela presença de quartzo (Figura 5.4c) e principalmente feldspato (Figura 5.3). O produto d>2,6 g/cm³ (54% em massa) é composto por duas principais fases (Figura 5.4d e Figura 5.3): quartzo+feldspato e minerais

máficos em partículas livres ou associados a pequenas proporções de pasta cimentícia.

Figura 5.4 - Imagens dos produtos da separação em líquido denso, fração -2,0+1,2 mm

A composição química determinada por FRX confirma os resultados da análise mineralógica por DRX e as interpretações das observações ao microscópio estereoscópico. Os elevados teores de $\text{CaO} + \text{PF}$ nos produtos $d < 2,2$ (39,5% para a amostra total) e $2,2 < d < 2,5$ (24,5%) estão relacionados à presença de materiais cimentícios. No produto $2,2 < d < 2,5$ verifica-se o aumento nos teores de alumina e K_2O , indicando enriquecimento de cerâmica e feldspato, enquanto que no produto $d > 2,6$ os minerais máficos e o quartzo verificados por DRX são confirmados pelo acréscimo nos teores de SiO_2 , Na_2O e K_2O .

As distribuições dos elementos indicam que apesar do produto $d < 2,2$ representar apenas 5,8% da massa, este é responsável por 17,5% do total contido de CaO+PF; se considerados os produtos abaixo de $2,5 \text{ g/cm}^3$ (25,4% da massa) este valor ultrapassa os 50%.

Considerando-se os totais acumulados nos produtos afundados, observa-se que a remoção do flutuado em 2,5 gera um produto com 74,6% da massa e apenas 45,6% de CaO+PF e cerca de 80% de sílica, alumina, ferro, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$. Considerando-se apenas os produtos afundados em 2,6, tem-se uma recuperação de 53,9% da massa, 32,5% de CaO+PF, 58,0% de sílica e 51,2% de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$.

5.1.1 Conclusões sobre a separabilidade por líquido denso

As separações sequenciais em líquidos com densidades crescentes demonstram que a composição dos produtos está fortemente associada à densidade da separação. Os produtos de menor densidade concentram preferencialmente as partículas ricas em pasta de cimento e cerâmica, ao passo que as partículas minerais mais liberadas são recuperadas preferencialmente nos produtos mais pesados.

A conjugação dos resultados de análises químicas e mineralógicas e das observações em microscópio estereoscópico permite concluir que a liberação entre os agregados e a pasta de cimento aumenta com o incremento da densidade da separação, sendo mais evidente nos produtos acima de $2,5 \text{ g/cm}^3$.

Com o foco na obtenção de fases menos porosas, a separação acima de $2,5 \text{ g/cm}^3$ possibilita a obtenção de um produto com recuperação mássica de 74,6% (total -3,0+0,15 mm) contendo cerca de 80% do total de sílica, alumina, óxido de ferro e $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ contidos e a remoção de cerca de 55% do total de CaO+PF.

Dessa forma, pode-se concluir que o agregado miúdo produzido a partir da britagem terciária em VSI apresenta potencial para a separação por densidade, principalmente abaixo da fração 1,2 mm (Figura 5.5), onde se verifica diminuição na distribuição acumulada de CaO+PF nos produtos pesados e acréscimo na distribuição de sílica.

Figura 5.5 - Distribuição acumulada de SiO₂ (a) e CaO+PF (b) nos produtos da separação em líquido denso

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES DAS FASES POR MEV-MLA

Uma análise qualitativa dos produtos das separações em líquido denso ao MEV-EDS por mapeamento da distribuição dos principais elementos presentes (Figura 5.6) permitiu identificar partículas de calcita (mapeamento em cor vermelha) e dolomita (mapeamento em cor laranja), concentradas exclusivamente no produto afundado $d > 2,6$.

Figura 5.6 - Discriminação das principais fases presentes a partir de mapeamento de raios X do produto afundado em 2,6 g/cm³

Devido à presença dos carbonatos, os teores de pasta de cimento determinados por ataque ácido são superestimados, uma vez que estas fases são também solubilizadas. Dessa forma, conclui-se que o método não deve ser aplicado sem que se conheçam as proporções de agregados calcários ou dolomíticos, ou esta deve ser corrigida pela subtração da proporção destes carbonatos.

Assim, a caracterização por MEV-MLA foi uma ferramenta utilizada inicialmente para quantificar estas fases e o teor de pasta de cimento real; os resultados permitiram também avaliar a separabilidade entre esta e as demais fases.

5.2.1 Conteúdo das fases presentes

Os principais resultados das caracterizações por MEV-MLA de todos os produtos obtidos ($d < 2,2$; $2,2 < d < 2,5$; $2,5 < d < 2,6$; $2,6 < d < 2,64$ e $d > 2,64$) são apresentados detalhadamente no APÊNDICE 6. As fases mais abundantes nos produtos das separações por densidade são apresentadas comparativamente na Figura 5.7. Os totais calculados por fração granulométrica e por produto da separação são mostrados, respectivamente, na Figura 5.8 e Figura 5.9, para todas as fases identificadas ao MLA.

Figura 5.7 - Principais fases presentes nos produtos da separação em líquido denso determinada por MEV-MLA (% massa)

Figura 5.8 - Sumário da composição dos produtos da separação em líquido denso por frações granulométricas determinada por MEV-MLA (% massa)

Figura 5.9 - Sumário da composição dos produtos da separação em líquido denso determinada por MEV-MLA para a fração -3,0+0,15 mm (% massa)

As principais fases presentes identificadas na amostra são quartzo (53% em média), feldspatos (23%) e a pasta de cimento (10%); fases secundárias são representadas por carbonatos (calcita+dolomita, totalizando 3,5%), cerâmica (3,4%), micas (3,5%), piroxênio+anfíbólio (2,2%). Outros minerais menores (1,1%) são representados por apatita, hematita, ilmenita, titanita e zircão.

Nas frações acima de 1,2 mm o conteúdo de pasta no produto $d < 2,2$ é da ordem de 30 a 40% e os conteúdos de quartzo e feldspatos somam 50 a 60%; nas frações mais finas verifica-se um crescimento progressivo nos teores de pasta de

cimento no produto de menor densidade, de 51%, 71% e 81%, indicando maior liberação entre a pasta de cimento e demais fases.

A fração mais fina ($-0,3+0,15$ mm) apresenta um comportamento ligeiramente diferente devido ao aumento de pasta de cimento. Nas demais frações (abaixo de $1,2$ e acima de $0,15$ mm), o conteúdo de quartzo aumenta de 35 a 64% para as frações mais finas; o inverso ocorre para os feldspatos com teores decrescentes de 36 para 16%, demonstrando concentração preferencial destes nas frações mais grossas, juntamente com os minerais máficos.

A pasta de cimento concentra-se essencialmente no produto flutuado em $2,2$ g/cm³ e, secundariamente, no produto entre $2,2$ e $2,5$ g/cm³. Os feldspatos estão presentes em todos os produtos acima de $2,2$ g/cm³, mas concentram-se preferencialmente nos produtos $2,5 < d < 2,6$ e $d > 2,64$ g/cm³. Analogamente, o quartzo destaca-se no produto $2,6 < d < 2,64$ g/cm³, onde representa cerca de 80% em massa do produto. Carbonatos, micas, minerais máficos e outros minerais menores concentram-se principalmente nos produtos afundados em $2,64$ g/cm³.

A composição dos produtos afundados passíveis de serem obtidos na separação em líquido denso em diferentes densidades é sumarizada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Composição dos produtos afundados em diferentes densidades determinada por MEV-MLA, total calculado $-3,0+0,15$ mm

Produtos da separação	Total	Fases no afundado (% massa)			
		$d > 2,2$	$d > 2,5$	$d > 2,6$	$d > 2,64$
% massa de produto	100	94	75	54	25
quartzo	53	55	56	59	37
feldspatos	23	24	25	22	29
pasta cimento	10	7,5	3,2	1,6	1,5
carbonatos	3,5	3,5	3,6	4,4	8,9
cerâmica	3,4	3,4	3,0	1,8	2,5
micas	3,5	3,6	4,3	5,6	11
pirox-anfib	2,2	2,3	2,9	3,9	7,4
outros	1,1	1,1	1,2	1,6	3,3

5.2.2 Associações entre as fases presentes

A caracterização por MLA mostra que a separação densitária gera um produto afundado com proporções de pasta de cimento progressivamente menores com o aumento da densidade da separação. A redução do conteúdo de pasta de cimento é mais expressiva acima de $2,5 \text{ g/cm}^3$, obtendo-se um produto com 75% em massa do total da amostra, 81% entre quartzo e feldspato e 3,2% de pasta de cimento. Estes resultados corroboram as informações obtidas pela caracterização química e mineralógica anteriormente apresentadas, onde se demonstrou que a composição dos produtos está diretamente relacionada com a densidade da separação, tal como ilustrado pelas imagens representativas obtidas ao MEV-MLA na Figura 5.10.

Do ponto de vista de liberação, é possível avaliar as associações das fases livres de pasta de cimento, doravante denominada "fases minerais" (quartzo+feldspato+minerais máficos+outras fases) com a fase de pasta de cimento. Dessa forma, tem-se partículas livres (> 95% da partícula sem pasta de cimento) ou mistas em partículas binárias (mistas com a pasta de cimento). As formas de associações são apresentadas detalhadamente no APÊNDICE 6, sendo na Figura 5.11 sumarizadas as associações das "fases minerais".

Verifica-se um aumento progressivo na proporção de partículas das fases livres de pasta de cimento nos produtos de maior densidade. Enquanto os produtos abaixo de $2,5 \text{ g/cm}^3$ apresentam no máximo 25% de partículas livres de pasta de cimento, no produto com densidade entre 2,5 e $2,6 \text{ g/cm}^3$ esta proporção aumenta para 64%, superando os 90% nos produtos afundados em $2,6 \text{ g/cm}^3$.

Para o total calculado no intervalo -3,0+0,15 mm tem-se 69% em massa de fases livres de pasta de cimento, considerando-se apenas os produtos acima de $2,5 \text{ g/cm}^3$ este valor chega a 85% (Tabela 5.3) com uma recuperação em massa de 75%, já para os produtos afundados em $2,6 \text{ g/cm}^3$ (54% em massa), a proporção de fases livres da pasta de cimento se eleva para 93%.

Figura 5.10 - Imagens representativas das associações caracterizadas ao MEV-MLA

Figura 5.11 - Formas de associação das fases minerais com a pasta de cimento determinada por MEV-MLA

Tabela 5.3 - Formas de associações das fases minerais determinada por MEV-MLA para produtos afundados em diferentes densidades, total calculado -3,0+0,15 mm

Produtos da separação	Total	Fases no afundado (% massa)			
		d>2,2	d>2,5	d>2,6	d>2,64
% massa de produto	100	94	75	54	25
Livres	69	72	85	93	94
Mista com pasta de cimento	31	28	15	7,1	6,0

O processamento das imagens digitais (MLA) permite determinar a distribuição da fase de interesse segundo a sua fração em área (área da partícula em relação à área total da partícula). Na Figura 5.12 são mostrados os espectros de liberação da fase composta por todas as fases sem pasta de cimento (denominadas aqui "fases minerais"). Por meio desta ferramenta é possível determinar a frequência de partículas com a proporção de pasta cimentícia desejada (0%, 5%, 10%, etc.).

Os resultados mostram um comportamento notadamente diferente para os produtos com densidade abaixo de 2,5 g/cm³, com menor proporção de fases minerais livres da pasta de cimento, tal como demonstrado pelas formas de associação das fases apresentadas na Figura 5.11. A liberação aumenta nos produtos de maior densidade, ou seja, estão associadas a proporções progressivamente menores de pasta cimentícia.

Os gráficos permitem determinar a proporção de partículas das fases minerais (sem pasta de cimento) que ocorrem com frações de pasta de cimento variáveis de 0 a 100% na partícula (em área). Exemplificando: nas frações granulométricas caracterizadas tem-se de 81 a 85% das partículas com mais de 90% de sua área composta pela fase de interesse, ou seja, com menos de 10% de pasta de cimento. Partículas totalmente liberadas da pasta (onde as fases minerais representam 100% da área da partícula) representam até 5% em área do total de partículas analisadas nas frações acima de 1,2 mm, aumentando até 24% nas frações mais finas.

Figura 5.12 - Espectros de liberação das fases minerais determinada por MEV-MLA

5.2.3 Partição do cálcio dentre as fases presentes

A proporção relativa de cálcio (distribuição ou partição) entre as fases portadoras do elemento, principalmente carbonatos, pasta de cimento e piroxênio+anfíbólio é apresentada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Proporção relativa de cálcio determinada por MEV-MLA nas fases portadoras

Fração (mm)	Distribuição de cálcio (%)					Total na fração
	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	
-3,0+2,0						
pasta	94	86	75	36	12	60
carbonatos	5,7	14	25	46	51	27
Piroxênio+anfíbólio	-	-	-	12	31	11
-2,0+1,2						
pasta	96	91	82	65	16	71
carbonatos	3,6	9,0	12	8,3	61	22
Piroxênio+anfíbólio	-	-	4,8	23	18	5,8
-1,2+0,60						
pasta	97	92	90	73	11	75
carbonatos	3,1	6,9	10	13	59	17
Piroxênio+anfíbólio	-	-	-	12	24	5,6
-0,60+0,30						
pasta	95	93	86	98	14	81
carbonatos	5,1	7,3	6,9	1,7	53	12
Piroxênio+anfíbólio	-	-	7,5	-	27	5,6
-0,30+0,15						
pasta	95	93	76	98	19	93
carbonatos	4,5	7,4	12	1,9	49	5,2
Piroxênio+anfíbólio	-	-	12	-	25	1,7
Total -3,0+0,15						
pasta	96	91	82	83	14	77
carbonatos	4,3	8,9	13	8,4	55	16
Piroxênio+anfíbólio	-	-	5,7	6,8	25	5,6

Os resultados demonstram que o cálcio está essencialmente associado à pasta de cimento nos produtos concentrados nas densidades abaixo de 2,64 g/cm³ (de 82 a 96% para o total -3,0+0,15 mm). Já nos produtos mais densos, os carbonatos e minerais máficos (piroxênios+anfíbólio) recuperam cerca de 80% do cálcio total presente na amostra, sendo em média 14% do cálcio dosado associado à pasta de cimento (11 a 19% para as diferentes frações granulométricas).

5.2.4 Correlação entre os resultados de MLA e FRX

A soma dos conteúdos de pasta de cimento e carbonatos determinada por MEV-MLA apresenta uma correlação linear com a soma dos teores de CaO com a perda ao fogo a 1.050°C (Figura 5.13a), assim como o conteúdo de feldspatos (Figura 5.13b) está diretamente relacionado com a soma dos teores de Na₂O e K₂O.

Figura 5.13 - Correlações entre o conteúdo de fases determinadas por MEV-MLA e dos resultados de análises químicas

A quantificação da pasta de cimento e carbonatos separadamente é particularmente importante na presença de agregados calcários que são erroneamente estimados como pasta de cimento por serem solubilizados por ácido clorídrico e, consequentemente, por elevarem os teores de CaO e a PF.

Os resultados mostraram que a proporção de carbonatos (calcita+dolomita) é mais expressiva nos produtos de maior densidade ($d > 2,64$ g/cm³; Figura 5.9 e APÊNDICE 6), enquanto que nestes produtos o teor de pasta decresce para valores inferiores a 2%. Assim, a estimativa do teor de pasta cimentícia por lixiviação por HCl ou pela soma CaO+PF em produtos de maior densidade passa a ser ainda mais equivocada, subestimando a qualidade de agregados miúdos reciclados de melhor qualidade. Os resultados são confirmados pela análise da distribuição de cálcio na pasta de cimento por MEV-MLA.

5.2.5 Conclusões sobre a caracterização das associações por MEV-MLA

Os resultados demonstram que a análise de imagens automatizada por MEV-MLA é uma ferramenta valiosa na quantificação de fases e na determinação das associações entre as fases presentes.

As correlações estabelecidas entre os resultados das análises químicas e as fases presentes identificadas ao MEV-MLA demonstram a robustez e confiabilidade da rotina de análise de imagens estabelecida. Adicionalmente, esta técnica permitiu identificar a composição de cada produto bem como as formas de associações das fases presentes e as curvas de liberação por densidade, permitindo a quantificação da proporção de partículas livres da pasta de cimento ou com conteúdos previamente estabelecidos.

A determinação da proporção relativa de cálcio nas fases portadoras demonstrou que mais de 20% do cálcio total presente não está associado à pasta de cimento (total $-3,0 \pm 0,15$ mm), e que, portanto, a estimativa de seu conteúdo pela soma do teor de CaO com a perda ao fogo é superestimado, uma vez que neste procedimento todo CaO é atribuído à pasta cimentícia.

A caracterização das associações dos agregados miúdos reciclados separados por líquido denso em diferentes densidades confirmou a separabilidade entre as fases enriquecidas em pasta de cimento e as demais fases minerais provenientes da cominuição das rochas, justificando os estudos de beneficiamento neste produto.

O procedimento empregado nos estudos por MEV-MLA mostrou-se preciso e robusto, sendo particularmente interessante na avaliação da eficiência dos processos de beneficiamento que visam à remoção da pasta. Para isto é necessário otimizar a rotina a fim de tornar o procedimento mais ágil, sem a necessidade de fracionamento por tamanho de partícula ou em classes de densidade.

Ressalta-se que o MLA permite o entendimento do comportamento dos agregados miúdos reciclados quando submetidos a processos de remoção da pasta de cimento ou a operações unitárias de tratamento de minérios para separação das fases porosas ricas em pasta cimentícia.

No entanto, trata-se de uma ferramenta de elevada complexidade, que exige grande capacitação técnica na sua operação, morosa, com elevado custo, fatores que somados tornam este procedimento limitado (poucos sistemas disponíveis no país).

Dessa forma, a análise por MLA foi preciosa no entendimento da liberação das fases presentes no agregado miúdo reciclado, no entanto, a quantificação da pasta de cimento para avaliação da eficiência dos processos de beneficiamento foi realizada por meio da soma dos teores de CaO com a perda ao fogo a 1.050°C, tal como demonstrado por Angulo e colaboradores (ANGULO, ULSEN *et al.*, 2009).

A principal justificativa é a agilidade do método, a sua significância dos resultados obtidos dada a correlação entre o conteúdo das fases determinadas por MLA com a soma de CaO+PF (Figura 5.13), o fato de cerca de 80% do total de cálcio estar associado à pasta cimentícia e a comprovação da correlação entre a pasta de cimento estimada por ataque ácido (QUARCIONI e CINCOTTO, 2006) e por CaO+PF para as amostras estudadas (Figura 5.14). Esta avaliação foi conduzida em produtos selecionados das separações (produtos da elutriação, separações em líquidos densos, frações granulométricas da amostra tal qual e dos produtos do VSI).

Frente ao exposto, nas etapas subsequentes de avaliação dos estudos de separabilidade apresentadas no Capítulo 6, adotou-se o conteúdo de CaO+PF como critério principal de avaliação dos produtos gerados, não tendo sido efetuadas análises por MLA.

Figura 5.14 - Correlação entre o teor de pasta de cimento estimada por ataque ácido e pela soma dos teores de CaO com a perda ao fogo

6 RESULTADOS DO BENEFICIAMENTO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO

6.1 REMOÇÃO DA PASTA DE CIMENTO POR ATRIÇÃO

As distribuições em massa dos produtos acima e abaixo de 0,15 mm para as diferentes condições de atrição avaliadas da amostra composta VSI 65-75 são apresentadas na Tabela 6.1 e a composição química dos produtos obtidos e distribuição dos principais constituintes na Tabela 6.2. Os teores e distribuições dos produtos +0,15 mm atricionados são apresentados comparativamente na Figura 6.1

Tabela 6.1 - Distribuição em massa dos produtos da atrição, amostra VSI 65-75

Fração (mm)	VSI 65-75*	800 rpm		1.200 rpm			1.700 rpm		
		5 min	20 min	5 min	12 min	20 min	5 min	12 min	20 min
+0,15	79%	79%	78%	78%	76%	75%	76%	72%	72%
-0,15	21%	21%	22%	22%	24%	25%	24%	28%	28%

* produto resultante da britagem em VSI sem atrição

Para condições mais brandas de atrição (800 rpm e 1.200 rpm a 5 min) as proporções de material abaixo de 0,15 mm estão em torno de 21 a 22%, semelhante à da inicial (VSI 65-75). O aumento da rotação da hélice promove maior geração de finos abaixo de 0,15 mm (24 a 28%). No entanto, o aumento de 12 para 20 minutos não altera a distribuição em massa para as frações consideradas, tanto para rotação de 1.200 como para 1.700 rpm.

Tabela 6.2 - Composição química de produtos de diferentes condições de atrição

	Produto / Fração	Massa (%)	Teores (%)								Distribuição (%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	PF	CaO +PF	SiO ₂	Na ₂ O+ K ₂ O	CaO +PF
VSI 65-75	<i>sem atrição</i>												
	+0,15 mm	79%	70,3	8,44	2,67	1,37	2,50	7,87	5,68	13,6	83,7	82,4	64,1
	-0,15 mm	21%	51,4	10,6	3,66	0,84	2,27	16,3	12,4	28,7	16,3	17,6	35,9
	Total calculado		66,3	8,89	2,88	1,26	2,45	9,64	7,07	16,7	100	100	100
Ensaio-1 800 rpm	<i>800 rpm 5 min.</i>												
	+0,15 mm	79%	69,5	8,44	2,82	1,45	2,48	7,74	5,18	12,9	83,3	81,7	64,2
	-0,15 mm	21%	52,5	9,94	3,77	1,06	2,25	16,0	11,1	27,1	16,7	18,3	35,8
	Total calculado		66,0	8,75	3,01	1,37	2,44	9,45	6,40	15,8	100	100	100
	<i>800 rpm 20 min.</i>												
	+0,15 mm	78%	69,2	8,44	2,73	1,39	2,45	8,00	5,59	13,6	82,7	81,8	63,1
Ensaio-2 1.200 rpm	-0,15 mm	22%	51,2	10,3	3,69	0,83	2,19	16,6	11,6	28,2	17,3	18,2	36,9
	Total calculado		65,2	8,84	2,94	1,26	2,39	9,86	6,90	16,8	100	100	100
	<i>1.200 rpm 5 min.</i>												
	+0,15 mm	78%	70,6	8,02	2,32	1,40	2,43	7,50	5,11	12,6	82,2	81,1	62,4
	-0,15 mm	22%	53,1	9,87	3,72	0,87	2,24	15,4	11,0	26,4	17,8	18,9	37,6
	Total calculado		66,7	8,43	2,63	1,28	2,39	9,27	6,43	15,7	100	100	100
	<i>1.200 rpm 12 min.</i>												
	+0,15 mm	76%	69,2	8,46	2,43	1,48	2,53	7,66	5,25	12,9	81,0	80,8	59,7
	-0,15 mm	24%	51,5	10,4	3,70	0,83	2,20	15,8	12,0	27,8	19,0	19,2	40,3
	Total calculado		65,0	8,92	2,73	1,32	2,45	9,61	6,86	16,5	100	100	100
	<i>1.200 rpm 20 min.</i>												
	+0,15 mm	75%	71,0	8,04	2,39	1,35	2,42	7,45	5,07	12,5	81,2	78,8	57,4
Ensaio-3 1.700 rpm	-0,15 mm	25%	50,5	10,5	3,70	0,91	2,21	16,5	12,0	28,5	18,8	21,2	42,6
	Total calculado		65,9	8,63	2,71	1,24	2,37	9,68	6,78	16,5	100	100	100
	<i>1.700 rpm 5 min.</i>												
	+0,15 mm	76%	70,4	8,00	2,40	1,41	2,40	7,73	5,24	13,0	81,7	79,8	59,5
	-0,15 mm	24%	50,9	10,2	3,65	0,86	2,25	16,5	12,0	28,5	18,3	20,2	40,5
	Total calculado		65,8	8,53	2,70	1,28	2,36	9,82	6,83	16,6	100	100	100
	<i>1.700 rpm 12 min.</i>												
	+0,15 mm	72%	71,8	7,79	2,23	1,37	2,41	7,18	4,85	12,0	78,1	74,1	52,1
	-0,15 mm	28%	51,5	10,5	3,54	1,16	2,21	16,2	12,1	28,3	21,9	25,9	47,9
	Total calculado		66,1	8,54	2,60	1,31	2,35	9,70	6,90	16,6	100	100	100
	<i>1.700 rpm 20 min.</i>												
	+0,15 mm	72%	71,9	7,76	2,58	1,42	2,43	6,47	5,16	11,6	78,7	76,0	49,7
	-0,15 mm	28%	49,3	10,4	3,74	0,91	2,17	16,5	13,3	29,8	21,3	24,0	50,3
	Total calculado		65,5	8,52	2,91	1,27	2,36	9,32	7,45	16,9	100	100	100

Figura 6.1 - Teores e distribuição dos principais elementos do produto +0,15 mm em diferentes condições de atrição

Os resultados de análise química mostram aumento discreto no teor de sílica para os produtos de condições mais severas de atrição, acompanhados por uma tendência na redução do conteúdo de $\text{CaO}+\text{PF}$. No entanto, as diferenças mais expressivas são refletidas em termos das distribuições de $\text{CaO}+\text{PF}$ com decréscimo de 64% (800 rpm - 5 min) para cerca de 50% (1.700 rpm - 12 e 20 min).

Os resultados demonstram ainda que os produtos de atrição com 12 minutos a 1.200 rpm e com 5 min a 1.700 rpm apresentam distribuições similares de $\text{CaO}+\text{PF}$ na fração +0,15 mm (59%).

Pela análise mineralógica por difratometria de raios X de produtos em diferentes condições de atrição verifica-se enriquecimento relativo de feldspato na fração +0,15 mm do produto que sofreu maior abrasão (mais tempo de atrição, Figura 6.2-a) e enriquecimento de calcita (Figura 6.2-b) e mica na fração -0,15 mm do mesmo produto.

Figura 6.2 - Difratogramas comparativos da fração +0,15 mm dos produtos da atrição em distintas condições

6.1.1 Conclusões sobre a atrição na remoção da pasta de cimento

A atrição do produto do VSI demonstra redução na proporção relativa da pasta de cimento nas frações acima de 0,15 mm, indicando aumento progressivamente crescente da distribuição de pasta cimentícia nos finos para condições mais severas de atrição (de 35,9% na amostra inicial VSI 65-75 sem atrição até 50,3%).

6.2 SEPARABILIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS POR ELUTRIAÇÃO

O estudo de separabilidade por elutriação foi realizado no produto composto VSI 65-75 com ensaios em frações granulométricas bastante estreitas. As condições foram estabelecidas com base nos resultados de separações em líquidos densos tendo por meta a obtenção de fração leve com massa da ordem de 20%.

A vazão ascendente de água (medida por rotâmetro) e a velocidade calculada (relação vazão/área da seção) apresentam uma elevada correlação linear ($R^2=0,95$)

com o diâmetro médio das partículas²⁷ (Figura 6.3). Os dados são concordantes com as curvas de calibração dos equipamentos empregado, realizada por Higa (HIGA, 2009).

Figura 6.3 - Correlação entre a vazão e a velocidade do fluido para o diâmetro médio das partículas

O comportamento menos regular da fração acima de 1,2 mm pode ser justificado pelo fato de que a interferência da parede do equipamento é maior nos produtos mais grossos, dado ao menor diâmetro do elutriador utilizado.

As distribuições em massa, a composição química e distribuição dos principais elementos para o total calculado no intervalo -2,0+0,15 mm são sumarizados na Tabela 6.3. Os resultados dos ensaios por fração granulométrica são detalhados no APÊNDICE 7, sendo os teores e distribuições dos principais compostos no produto pesado mostrados comparativamente na Figura 6.4. Difrátogramas de raios X de produtos leve e pesado da elutriação são expostos na Figura 6.5.

²⁷ Média do intervalo granulométrico considerado.

Tabela 6.3 - Sumário dos resultados da elutriação, total calculado -2,0+0,15 mm

Fração (mm)	Massa (%)			Teores (%)								Distribuição (%)				
	ensaio	d>2,6	ME (g/cm ³)	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	Na ₂ O +K ₂ O	CaO +PF
-2,0+0,15																
pesado	79,7	57,1	2,60	75,3	7,11	2,41	1,25	2,22	0,87	9,68		82,9	75,5	76,1	81,3	63,8
leve	20,3	25,2	2,43	60,4	8,92	2,96	0,78	2,27	1,70	21,7		17,1	24,5	23,9	18,7	36,2
Total	100	50,7	2,57	72,4	7,45	2,51	1,15	2,22	1,03	12,1		100	100	100	100	100

Nota: ME - massa específica determinada por picnometria.

A elutriação, nas condições operacionais estabelecidas, gera um produto pesado com recuperação em massa de cerca de 80%, com massa específica de 2,60 g/cm³ e 57% em massa no produto afundado em 2,6 g/cm³. O produto leve (leve da elutriação com 20% da massa da amostra) apresenta massa específica de 2,43 g/cm³ e apenas 25% de material no produto d>2,6 g/cm³.

Tais resultados confirmam a concentração preferencial das fases porosas no produto leve, enquanto que as partículas de menor porosidade concentram-se no produto pesado. As distribuições confirmam empobrecimento de CaO+PF no produto pesado (Figura 6.4b), com teores da ordem de duas vezes menores do que no produto leve (APÊNDICE 7).

Figura 6.4 - Teores (a) e distribuição (b) dos principais elementos do produto pesado da elutriação

Figura 6.5 - Difratomogramas comparativos de produtos da elutriação

Considerando-se a composição por fração granulométrica (Figura 6.4a), verifica-se um aumento expressivo de sílica para as frações mais finas, acompanhado pela redução de CaO+PF e Na₂O+K₂O. O aumento de sílica deve-se à presença de quartzo originalmente presente nos agregados miúdos, confirmado pela análise mineralógica por DRX (Figura 6.5). As reduções nos teores de CaO+PF nos produtos pesados mais finos indicam liberação entre a pasta cimentícia e os agregados naturais, conforme assinalado na separabilidade por líquido densos.

Os teores de Na₂O são essencialmente relacionados ao feldspato sódico (albita) e, por isso, são significativamente maiores no produto pesado (1,25% contra 0,78% no leve). K₂O está presente também no produto leve já que está relacionado tanto com a presença de feldspatos (microclínio/ortoclásio) como também às micas (flogopita/biotita/muscovita).

As distribuições indicam que 36% do total de CaO+PF está associada ao produto leve da elutriação, apesar de este representar apenas 20% em massa no intervalo granulométrico considerado. Por outro lado, cerca de 75 a 85% dos totais de sílica, alumina, Fe₂O₃ e Na₂O+K₂O contidos estão associados ao produto pesado.

Imagens representativas de frações selecionadas dos produtos da elutriação em microscópio estereoscópico são apresentadas na Figura 6.6 e ilustram os resultados da separação. O produto pesado da fração mais grossa (Figura 6.6a) é constituído essencialmente pelos minerais oriundos de rochas (quartzo, feldspato e minerais máficos) e partículas com remanescente pasta de cimento aderida. Já na fração mais fina (Figura 6.6b) o produto pesado é composto majoritariamente por quartzo e feldspato em partículas livres.

Fração -2,0+1,2 mm - produto leve

Fração -2,0+1,2 mm - produto pesado

Fração -0,60+0,30 mm - produto leve

Fração -0,60+0,30 mm - produto pesado

PC = partículas com elevado conteúdo de pasta cimentícia aderida; L partículas livres; R+PC = agregados líticos de rochas com pasta de cimento; MM - minerais máficos

Figura 6.6 - Imagens representativas de produtos selecionados da elutriação

6.2.1 Conclusões sobre a separabilidade por elutriação

Os agregados miúdos produzidos por britagem terciária de RCD em britador de impacto vertical apresentam comprovado potencial de separabilidade por elutriação em intervalos granulométricos estreitos de 1,2 a 0,15 mm.

O produto pesado da elutriação corresponde a cerca de 80% em massa da amostra para o intervalo granulométrico considerado (-2,0+0,15 mm), com maior massa específica em relação ao produto leve (2,60 e 2,43 g/cm³), menores teores de CaO+PF (9,7 e 21,7%) e maior proporção de material no produto afundado em 2,6 g/cm³ (57,1 e 20,3%). A difratometria de raios X e as imagens em microscópio estereoscópico confirmam a concentração preferencial de silicatos (quartzo, feldspato etc.) no produto pesado, especialmente nas frações mais finas, acompanhado pela redução do conteúdo de fases porosas e mistas.

6.3 CONCENTRAÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS EM MESA OSCILATÓRIA

Os resultados dos estudos de separabilidade de agregados miúdos em mesa oscilatória (amostra VSI 65-75) são apresentados separadamente, conforme sequência descrita no procedimento experimental, sendo:

- a) ensaios exploratórios em frações granulométricas estreitas;
- b) em três frações granulométricas obtidas por peneiramento do produto de britagem em rolos abaixo de 1,2 mm.

6.3.1 Ensaios exploratórios em frações granulométricas estreitas

O sumário dos resultados da concentração exploratória em mesa concentradora Wilfley por fração granulométrica do produto composto VSI 65-75 são apresentados na Tabela 6.4. Os resultados por fração granulométrica são detalhados no APÊNDICE 8, sendo os teores e distribuições dos principais compostos do produto pesado mostrados comparativamente na Figura 6.7 e difratogramas de raios X de frações selecionadas dos produtos leve e pesado na Figura 6.8.

Tabela 6.4 - Sumário dos resultados de concentração em mesa Wilfley, total calculado -2,0+0,15 mm

Fração (mm)	Massa (%)			Teores (%)								Distribuição (%)				
	ensaio	d>2,6	ME (g/cm ³)	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	Na ₂ O +K ₂ O	CaO +PF
-2,0+0,15																
pesado	72,6	60,7	2,62	74,6	7,38	2,23	1,35	2,30	0,92	10,1		75,8	70,1	72,1	74,9	57,3
leve	27,4	25,7	2,41	63,2	8,37	2,29	0,96	2,29	1,43	20,0		24,2	29,9	27,9	25,1	42,7
Total	100,0	51,1	2,56	71,5	7,65	2,25	1,25	2,29	1,06	12,8		100	100	100	100	100

Nota: ME - massa específica determinada por picnometria

A concentração em mesa vibratória, nas condições operacionais estabelecidas, gerou um produto pesado com cerca de 70% em massa (média para o total calculado -2,0+0,15 mm) com massa específica de 2,62 e 60% em massa no produto afundado em 2,6 g/cm³. O produto leve (distribuição média de 30% em massa) apresenta massa específica de 2,41 e apenas 26% de material no produto d>2,6 g/cm³.

Tais resultados, à semelhança das separações em líquido denso e elutriação, evidenciam a concentração preferencial das fases porosas no produto leve enquanto que as partículas de menor porosidade (maior proporção de material em d>2,6 g/cm³) concentram-se no produto pesado. As distribuições confirmam empobrecimento de CaO+PF no produto pesado com teores da ordem de duas vezes menores do que no produto leve.

(a) teores

(b) distribuição

Figura 6.7 - Teores (a) e distribuição (b) dos principais elementos dos produtos pesados da concentração em mesa Wilfley

Figura 6.8 - Difractogramas comparativos de produtos de concentração em mesa Wilfley

Considerando-se a composição por fração granulométrica (Figura 6.7a), verifica-se um aumento de até 15% nos teores de sílica nas frações mais finas, acompanhado pela redução de CaO+PF e Na₂O+K₂O.

O aumento de sílica deve-se à presença de quartzo originalmente presente nos agregados miúdos, confirmado pela análise mineralógica por DRX (Figura 6.8a). As reduções nos teores de CaO+PF no produto pesado das frações finas indicam liberação entre a pasta cimentícia e os agregados naturais. Os teores de Na₂O são maiores no produto pesado (1,35% contra 0,96% no leve), indicando maior proporção feldspato sódico (albita, Figura 6.8b).

As distribuições indicam que 43% do total de CaO+PF está associada ao produto leve da mesa, apesar de este representar apenas 27% em massa no intervalo granulométrico considerado. Por outro lado, as recuperações de sílica, alumina, Fe₂O₃ e Na₂O+K₂O no produto pesado são da ordem de 70 a 75%.

Imagens representativas em microscópio estereoscópico dos produtos pesados da concentração em mesa oscilatória mostram um produto pesado rico em quartzo e aluminossilicatos com pequena proporção de pasta de cimento aderida (Figura 6.9c, d). Na fração mais grossa (-1,7+1,2 mm, Figura 6.9c) verifica-se maior

proporção de minerais máficos em relação à fração mais fina enriquecida em quartzo (-0,42+0,30 mm, Figura 6.9d). Já o produto leve é composto essencialmente por partículas ricas em pasta de cimento e material cerâmico (maior porosidade, Figura 6.9a, b).

PC = partículas com elevado conteúdo de pasta cimentícia aderida; L partículas livres; R+PC = agregados líticos de rochas com pasta de cimento; MM - minerais máficos

Figura 6.9 - Imagens representativas de produtos de concentração em mesa Wilfley

Os resultados detalhados das análises químicas por fração granulométrica (APÊNDICE 8) demonstram que o comportamento das partículas na mesa concentradora reflete a menor liberação entre a pasta de cimento e os agregados nas frações acima de 1,2 mm, conforme anteriormente demonstrado pela caracterização tecnológica das areias produzidas por britagem em VSI.

6.3.2 Ensaios no produto de britagem abaixo de 1,2 mm

Os resultados da concentração em mesa oscilatória Wilfley do produto britado em rolos abaixo de 1,2 mm são apresentados na Tabela 6.5. Os teores e distribuições dos principais compostos são apresentados comparativamente na Figura 6.10 e difratogramas de raios X de uma fração selecionada na Figura 6.11.

Tabela 6.5 - Resultados de concentração em mesa Wilfley do produto britado

Fração (mm)	Massa (%)		ME (g/cm³)	Teores (%)								Distribuição (%)				
	ensaio	d>2,6		SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Na₂O	K₂O	MgO	CaO +PF	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Na₂O +K₂O	CaO +PF	
PB -1,2+0,60																
pesado	68,9	67,7	2,62	71,0	8,78	2,24	1,68	2,67	1,06	11,5	70,2	68,7	68,7	70,7	62,4	
leve	31,1	41,2	2,49	66,7	8,88	2,26	1,42	2,57	1,21	15,4	29,8	31,3	31,3	29,3	37,6	
Total	100,0	59,5	2,58	69,7	8,81	2,25	1,60	2,64	1,11	12,7	100	100	100	100	100	
PB -0,60+0,30																
pesado	79,5	58,6	2,61	74,6	7,08	2,40	1,34	2,18	0,93	10,2	82,2	76,4	78,1	80,5	65,8	
leve	20,5	29,7	2,44	62,8	8,51	2,61	1,01	2,31	1,38	20,5	17,8	23,6	21,9	19,5	34,2	
Total	100,0	52,7	2,58	72,2	7,37	2,44	1,27	2,21	1,02	12,3	100	100	100	100	100	
PB -0,30+0,15																
pesado	72,4	53,7	2,64	73,2	6,68	3,08	1,00	2,08	0,92	11,7	76,8	71,0	73,0	77,3	61,2	
leve	27,6	28,6	2,43	58,0	8,79	3,21	0,93	2,36	1,66	23,8	23,2	29,0	27,0	22,7	38,8	
Total	100,0	46,7	2,58	69,0	7,26	3,12	0,98	2,16	1,12	15,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
PB -1,2+0,15																
pesado	73,9	60,0	2,62	73,0	7,51	2,55	1,35	2,31	0,97	11,1	76,8	71,0	73,0	77,3	61,2	
leve	26,1	33,1	2,45	62,6	8,71	2,68	1,12	2,41	1,41	19,9	23,2	29,0	27,0	22,7	38,8	
Total	100,0	53,0	2,58	70,3	7,82	2,59	1,29	2,33	1,08	13,4	100	100	100	100	100	

Nota: ME - massa específica determinada por picnometria

A concentração em mesa do produto britado, realizada em intervalos granulométricos mais amplos (-1,2+0,60; -0,60+0,30 e -0,30+0,15 mm) demonstra ser seletiva na separação de fases com diferentes conteúdos de material poroso (diferenças entre massa específica de 2,62 e 2,45 g/cm³ e da proporção de material em d>2,6 de 60 para 33% na média). Os teores de CaO+PF são duas vezes menores no produto pesado, o qual apresenta maior proporção relativa de feldspato, mica, quartzo e piroxênio (Figura 6.11).

Figura 6.10 - Teores (a) e distribuição (b) dos principais elementos dos produtos da concentração em mesa Wilfley, produto britado

As análises granulométricas (Figura 6.12a) e morfológicas (Figura 6.12b) dos produtos gerados através de análise de imagens dinâmica (Camsizer) evidenciam que não houve segregação em função do tamanho ou forma das partículas de modo que a concentração ocorreu essencialmente com base na densidade das fases.

Figura 6.12 - Análises granulométricas e morfológicas comparativas dos produtos da concentração em mesa Wilfley, produto britado

6.3.3 Conclusões sobre a concentração em mesa oscilatória

A concentração de agregados miúdos reciclados em mesa oscilatória Wilfley permitiu a obtenção de um produto pesado com menor proporção relativa de fases porosas (reduzidos teores de CaO+PF, maior massa específica aparente e aumento da proporção em $d > 2,6 \text{ g/cm}^3$).

Os resultados comparativos dos produtos obtidos na concentração das amostras classificadas em intervalos granulométricos estreitos e do produto britado são apresentados na Tabela 6.6 e demonstram a separabilidade das partículas com diferentes conteúdos de pasta de cimento.

Tabela 6.6 - Comparação entre os produtos pesados obtidos por concentração em mesa oscilatória por fração e para o produto britado

Massa (%) ensaio amostra			ME (g/cm³)	Teores (%)							Distribuição ensaio (%)				
				SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Na₂O	K₂O	MgO	CaO +PF	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Na₂O +K₂O	CaO +PF
-2,0+0,15 mm															
72,6	43,6	2,62	74,6	7,38	2,23	1,35	2,30	0,92	10,1	75,8	70,1	72,1	74,9	57,3	
PB -1,2+0,15 mm															
73,9	53,8	2,62	73,0	7,51	2,55	1,35	2,31	0,97	11,1	76,8	71,0	73,0	77,3	61,2	

As distribuições granulométricas por análise de imagem dinâmica dos produtos gerados mostraram que não houve segregação dos produtos em função do tamanho ou forma das partículas, comprovando que a densidade foi a propriedade diferenciadora na separação.

Os resultados obtidos para os ensaios por fração granulométrica e do produto britado são similares, no entanto, a britagem abaixo de 1,2 mm permite melhor adequação da granulação da amostra com os limites de operação do equipamento. Dessa forma, as distribuições em massa nos produtos pesados são, respectivamente, 43,6% e 53,8%.

6.4 CONCENTRAÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS EM ESPIRAL

Três alíquotas representativas do produto composto VSI 65-75, com cerca de 200 kg cada, foram processadas em espirais, em três diferentes arranjos.

O fluxograma do Arranjo 1, com os dados de distribuição de massa e massa específica dos produtos é apresentado na Figura 6.13. As curvas de distribuição granulométrica por peneiramento a úmido e o sumário dos resultados da análise de imagens dinâmica são apresentados, respectivamente, Figura 6.14 e Tabela 6.7.

Figura 6.13 - Fluxograma de concentração por espirais, Arranjo 1

Figura 6.14 - Distribuição granulométrica dos produtos da espiral, Arranjo 1

Tabela 6.7 - Granulometria e forma de partículas por análise de imagens dinâmica, Arranjo 1

Tamanho / forma	Cleaner WW6	Scavenger LG7		
	pesado	pesado	leve	misto
Diâmetro médio (mm)	0,148	0,173	0,799	0,727
Esfericidade média	0,861	0,821	0,826	0,843
Média b/l	0,675	0,658	0,668	0,677

Para o Arranjo 1, o pesado cleaner²⁸ corresponde a 20% em massa dos produtos e apresenta massa específica de 2,66 g/cm³, notadamente superior à dos demais produtos. Este é também o produto de distribuição granulométrica mais fina.

Os produtos da etapa scavenger apresentam massa específica entre 2,51 e 2,55 g/cm³ e uma distribuição granulométrica ampla e bem diferenciada para cada produto, exaltando que a separação se procedeu em função do tamanho das partículas.

Nessa configuração verifica-se que a separação ocorreu essencialmente em função do tamanho das partículas (Figura 6.14) e não por diferença de densidade, tampouco por efeito de forma, dada a semelhança nas propriedades morfológicas analisadas (Tabela 6.7).

Assim, foi avaliada a separação conforme o segundo arranjo, cujo fluxograma juntamente com os dados de distribuição de massa e massa específica dos produtos é apresentado na Figura 6.15. As curvas de distribuição granulométrica por peneiramento a úmido e o sumário dos resultados da análise de imagem dinâmica são apresentados, respectivamente, na Figura 6.16 e Tabela 6.8.

²⁸ *Rougher, cleaner e scavenger são termos utilizados em tratamento de minérios para designar diferentes etapas do processamento; não há termos correspondentes em português. De modo simplificado significam, respectivamente: primeira etapa de concentração ou desbaste (rougher), etapa de limpeza do concentrado (cleaner) e nova etapa de concentração do rejeito (scavenger).*

Figura 6.15 - Fluxograma de concentração por espirais, Arranjo 2

Figura 6.16 - Distribuição granulométrica dos produtos da espiral, Arranjo 2

Tabela 6.8 - Granulometria e forma de partículas por análise de imagens dinâmica, Arranjo 2

Tamanho / forma	Rougher LG7 pesado	Scavenger-1 LG7			Scavenger-2 WW6	
		pesado	misto	leve	pesado	leve
Diâmetro médio (mm)	0,167	0,221	0,412	0,750	0,400	2,268
Esfericidade média	0,852	0,835	0,824	0,827	0,800	0,854
Média b/l	0,670	0,666	0,668	0,671	0,662	0,687

No segundo arranjo, aumentou-se a recuperação em massa do produto final obtido na etapa rougher de 20 para 27%, de forma que a massa específica deste produto caiu de 2,66 para 2,61 g/cm³.

Os produtos pesado e misto da etapa scavenger do produto misto do rougher apresentam, respectivamente, massa específica de 2,57 e 2,54 g/cm³ e distribuições de massa de 13 e 22%. O produto leve desta etapa tem massa específica de 2,47 g/cm³ e apenas 5% em massa.

Já a etapa de limpeza do leve rougher (scavenger-2), gera um produto leve com 21% em massa e ME = 2,56 g/cm³ e um pesado com 12% em massa de ME = 2,51 g/cm³. Nessa etapa o pesado apresenta menor massa específica do que o leve, assim como observado no arranjo-1, fato que pode estar relacionado à concentração preferencial pelo tamanho das partículas.

Novamente, nota-se que a separação ocorreu essencialmente em função do tamanho das partículas (Figura 6.16) e não por diferença de densidade nem por efeito de forma, dada a semelhança nas propriedades morfológicas analisadas (Tabela 6.8).

Complementarmente, foi avaliada a eficiência da separação em um terceiro arranjo, cujo fluxograma juntamente com os dados de distribuição de massa e massa específica dos produtos é apresentado na Figura 6.17. As curvas de distribuição granulométrica por peneiramento a úmido e o sumário dos resultados da análise de imagem dinâmica são apresentados, respectivamente, na Figura 6.18 e Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Granulometria e forma de partículas por análise de imagens dinâmica, Arranjo 3

Tamanho / forma	Rougher LG7 pesado	Scavenger-1 LG7 pesado misto		Scavenger-2 WW6 leve
Diâmetro médio (mm)	0,154	0,192	0,350	2,307
Esfericidade média	0,889	0,829	0,817	0,850
Média b/l	0,667	0,664	0,665	0,695

No Arranjo 3 verifica-se que os pesados rougher e scavenger-1 apresentam distribuição de tamanho de partículas similar e mais fino em relação aos demais produtos, além de maiores valores de massa específica (totalizam 37% da massa dos produtos e tem ME de 2,63 e 2,54 g/cm³, respectivamente). O produto misto do scavenger apresenta distribuição granulométrica mais grossa e ME = 2,49 g/cm³, assim como o leve scavenger-2; no entanto, este produto é muito mais grosso que os demais.

Desse modo verifica-se que a separação procedeu-se essencialmente em função do tamanho das partículas (Figura 6.18) e não por diferença de densidade nem por efeito de forma, dada a semelhança nas propriedades morfológicas analisadas (Tabela 6.9).

6.4.1 Conclusões sobre a concentração em espirais

Em todos os ensaios de concentração em espiral é notória a segregação por tamanho de partículas, evidenciando que a concentração de agregados miúdos reciclados em espiral concentradora foi pouco seletiva para a amostra total.

Tendo em vista a elevada separabilidade densitária demonstrada pela separação em líquido denso, pela elutriação e pela mesa oscilatória, sugere-se que a concentração por espirais seja realizada também avaliada em intervalos granulométricos mais estreitos ou diferentes perfis.

Considerando que as espirais são os equipamentos de concentração densitária mais sensíveis à distribuição de tamanho de partículas, com grande influência da taxa de alimentação de sólidos e, dada a complexidade na combinação entre as características construtivas e as variáveis operacionais do equipamento, os resultados não excluem a possibilidade da concentração em espirais ser bem

sucedida em agregados miúdos reciclados. Outras opções poderiam ser avaliadas para concentrações em frações granulométricas mais estreitas, espirais com diferentes perfis, ensaios com maior quantidade de amostra e por maior tempo e variação da taxa de alimentação.

6.5 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS

6.5.1 Separador magnético Frantz de barreiras

Os estudos de separabilidade magnética dos agregados miúdos reciclados foram conduzidos em alíquotas representativas do produto VSI-75, em separador Frantz de barreiras, com o objetivo foi avaliar a separabilidade entre as partículas ricas em pasta de cimento e as demais fases presentes. O procedimento experimental foi sendo realizado em duas etapas:

- a) nos produtos separados por densidade: para avaliação da separação magnética em produtos com distintos conteúdos de pasta de cimento;
- b) por fração granulométrica.

6.5.1.1 Separações magnéticas nos produtos por densidade

Os resultados das separações magnéticas em equipamento Frantz de barreiras, para a fração $-0,60+0,30$ mm, dos produtos das separações sequenciais em líquidos densos, são apresentadas na Figura 6.19.

A distribuição de massa nos produtos obtidos demonstra claramente o comportamento diferencial do material nas classes de densidade abaixo de $2,5 \text{ g/cm}^3$.

O produto com mais alto teor de pasta de cimento e fases porosas ($d < 2,2$) apresenta 87% de material magnético em 0,6A (8,9 kGauss), dos quais 68% em massa concentra-se no produto fortemente magnético (magnético na intensidade de 0,2A - 3,3 kGauss). O produto entre 2,2 e 2,5, também rico em pasta de cimento e fases porosas, tem da mesma forma um comportamento diferenciado, em que 68% de sua massa concentra-se nos magnético até 0,6A.

Com o aumento da densidade da separação acima de $2,5 \text{ g/cm}^3$ e, portanto, redução no conteúdo das fases porosas, observa-se um comportamento inverso, com notável decréscimo na distribuição de massa nos produtos magnéticos, que representam apenas 20% em massa.

Figura 6.19 - Curvas de separabilidade magnética por classe de densidade

Dessa forma, verifica-se que as fases porosas enriquecidas em pasta de cimento concentram-se majoritariamente no produto magnético. Portanto, a susceptibilidade magnética mostrou-se uma propriedade diferenciadora potencial na separação entre agregados miúdos reciclados com diferentes proporções de pasta de cimento aderida.

6.5.1.2 Por fração granulométrica

As distribuições em massa, os teores e distribuições dos principais óxidos para o total calculado da amostra ($-3,0+0,15 \text{ mm}$) são sumarizados na Tabela 6.10; já os resultados por fração granulométrica são detalhados no APÊNDICE 9.

As curvas de separabilidade magnética e as distribuições acumuladas dos principais teores e da massa por fração granulométrica são apresentadas na Figura 6.20, enquanto os teores de SiO_2 , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ e $\text{CaO}+\text{PF}$ são comparados na Figura 6.21.

Tabela 6.10 - Sumário dos resultados da separação magnética em Frantz de barreiras, total calculado -3,0+0,15 mm

Produtos	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição (%)				
		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
-3,0+0,15mm																
Mag 0,05 A	9,0	59,4	13,3	7,28	2,94	3,50	1,64	6,66	3,03	9,70		7,8	14,8	19,6	20,4	13,2
Mag 0,25 A	13,6	57,9	10,1	5,52	1,48	2,63	1,91	11,8	6,20	18,0		11,5	17,2	22,5	15,5	15,0
Mag 0,60 A	17,9	57,8	11,1	4,49	1,34	2,59	1,69	11,7	7,23	19,0		15,1	24,9	24,2	18,6	19,5
Não-Mag 0,60A	59,6	75,4	5,78	1,88	0,99	2,09	0,71	6,7	5,0	11,6		65,7	43,1	33,7	45,5	52,4
Total calc.	100	68,5	8,00	3,32	1,29	2,38	1,13	8,29	5,36	13,6		100	100	100	100	100
Total acum.																
Não-Mag 0,05A	91,1	69,3	7,47	2,94	1,13	2,27	1,08	8,44	5,62	14,0		92,3	85,2	80,4	79,6	86,9
Não-Mag 0,25A	77,5	71,3	7,01	2,48	1,07	2,21	0,94	7,85	5,52	13,3		80,8	68,0	57,9	64,1	71,9
Não-Mag 0,60A	59,6	75,4	5,78	1,88	0,99	2,09	0,71	6,70	5,00	11,6		65,7	43,1	33,7	45,5	52,4

(a) curvas de separabilidade acumulada no não-magnético

(b) distribuição acumulada no não-magnético

Figura 6.20 - Curvas de separabilidade magnética por fração granulométrica (a) e distribuição acumulada das principais fases presentes (b)

As curvas de separabilidade por fração demonstram que a distribuição em massa no produto não-magnético aumenta de 39 para 75% das frações granulométricas mais grossas para as mais finas.

Figura 6.21 - Teores dos principais constituintes dos produtos das separações magnéticas em Frantz de barreiras

As frações acima de 1,2 mm apresentam comportamento notadamente diferente do que as frações abaixo dessa granulometria (Figura 6.21, APÊNDICE 9), confirmadas pela difratometria de raios X, cujos resultados para duas frações granulométricas selecionadas são apresentados na Figura 6.22 e Figura 6.23.

Os maiores teores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ são atribuídos essencialmente à presença de feldspato e secundariamente aos minerais pesados resultantes da cominuição das rochas (piroxênio/anfibólio). Já nas frações abaixo de 1,2 mm, verifica-se um notável decréscimo nos teores de $\text{CaO}+\text{PF}$ nos produtos não magnéticos, indicando a liberação entre a pasta de cimento e os agregados naturais.

Figura 6.22 - Difratomogramas comparativos de produtos da separação magnética para a fração -2,0+1,2mm

Figura 6.23 - Difratomogramas comparativos de produtos da separação magnética para a fração -0,60+0,30mm

Apesar da redução nos teores de CaO+PF no produto não magnético, sua distribuição é da ordem de 50% devido à elevada proporção em massa deste produto. Por outro lado, a distribuição dos principais elementos constituintes dos

agregados (sílica, Na_2O e K_2O) supera a distribuição em massa no produto, indicando enriquecimento de quartzo e feldspato.

Os resultados para a amostra total (-3,0+0,15 mm) mostram que a separação magnética em Frantz de barreiras a 0,60A (8,9 kGauss) gera um produto não magnético com cerca de 60% em massa da amostra. Os teores de sílica e $\text{CaO}+\text{PF}$ são, respectivamente, 75,4 e 11,6% e as distribuições de 65,7 e 52,4%.

Considerando-se uma separação a 0,25 A (remoção dos produtos magnéticos a 0,05 a 0,25A), a recuperação em massa no ensaio do produto não magnético aumenta para 77,5% com teor de sílica de 71,3% (distribuição de 80,8%) e 13,3% de $\text{CaO}+\text{PF}$ (distribuição de 71,9%).

Imagens representativas em lupa estereoscópica são expostas na Figura 6.24 e ilustram a composição dos produtos. As imagens confirmam os resultados das análises químicas e mineralógicas, com detalhe à presença de minerais máficos e cerâmica nos produtos magnéticos e enriquecimento de quartzo nos não magnéticos. Pelas fotomicrografias nota-se também maior proporção de pasta de cimento aderida às partículas de agregados na fração acima de 1,2 mm indicando menor liberação entre as fases, tal como anteriormente indicado pelos resultados da composição química.

Figura 6.24 - Imagens representativas de produtos da separação em Frantz de barreiras

6.5.2 Separador magnético de rolo de terras raras (RE-Rol)

Uma vez verificado o potencial da separabilidade magnética foram realizadas separações em rolos de terras raras (RE-Roll). Os ensaios foram efetuados tanto em frações granulométricas da areia de VSI 65-75, como no produto britado abaixo de 1,2 mm.

6.5.2.1 Ensaios em Re-Roll por fração granulométrica

O sumário dos resultados da separação magnética em RE-Roll (amostra composta VSI 65-75) são apresentados na Tabela 6.11. Os resultados de todos os produtos gerados na separação são detalhados no APÊNDICE 9.

As curvas de separabilidade magnética comparativas para os ensaios na amostra tal qual são apresentadas na Figura 6.25, enquanto os teores de SiO_2 , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ e $\text{CaO}+\text{PF}$ são comparados na Figura 6.26.

Tabela 6.11 - Sumário dos resultados de separação magnética em RE-Roll

Produtos RE-Roll	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição (%)				
		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	
Fração -1,2+0,60 mm																
Mag	46,7	61,5	10,8	3,81	1,72	2,78	1,58	10,2	6,36	16,6	40,3	62,8	75,4	55,2	62,6	
NMag	53,3	79,9	5,58	1,09	1,04	2,16	0,52	4,75	3,92	8,67	59,7	37,2	24,6	44,8	37,4	
Total	100,0	71,3	8,01	2,36	1,36	2,45	1,02	7,31	5,06	12,4	100	100	100	100	100	
Fração -0,60+0,15 mm																
Mag	30,6	52,6	10,2	5,51	1,08	2,32	2,25	14,8	9,50	21,9	22,3	46,6	71,7	36,2	54,6	
NMag	69,4	81,0	5,17	0,96	0,85	1,80	0,45	5,20	3,73	8,03	77,7	53,4	28,3	63,8	45,4	
Total	100,0	72,3	6,72	2,35	0,92	1,96	1,00	7,33	4,95	12,3	100	100	100	100	100	
Total -1,2+0,15 mm - CALCULADO																
Mag	36,9	56,1	10,4	4,85	1,33	2,50	1,99	13,0	8,29	19,8	29,3	52,9	73,2	43,6	57,7	
NMag	63,1	80,6	5,33	1,01	0,93	1,94	0,48	5,02	3,80	8,28	70,7	47,1	26,8	56,4	42,3	
Total	100,0	71,6	7,21	2,43	1,08	2,15	1,04	7,98	5,46	12,5	100	100	100	100	100	
Total -1,2+0,15 mm - ENSAIO RE-Roll																
Mag	40,7	58,3	9,99	4,48	1,26	2,46	1,77	12,4	7,86	20,2	32,7	58,0	74,9	48,0	64,7	
NMag	59,3	82,3	4,96	1,03	0,87	1,89	0,37	4,23	3,34	7,57	67,3	42,0	25,1	52,0	35,3	
Total	100,0	72,5	7,01	2,44	1,03	2,12	0,94	7,55	5,18	12,7	100	100	100	100	100	

Nota: produto não magnético é resultado da composição dos produtos Mag1, Mag2, Misto2, NMag2.

Total calculado = composição calculada dos produtos -1,2+0,6mm e -0,6+0,15mm. Total ensaiado = separação realizada com a amostra total -1,2+0,15mm.

Figura 6.25 - Curvas de separabilidade magnética em Re-Roll acumuladas no produto não magnético, por fração granulométrica

Figura 6.26 - Teores dos principais constituintes dos produtos das separações magnéticas RE-Roll por fração

As curvas de separabilidade magnética mostram que a fração -0,60+0,15 mm apresenta maior proporção de produto não magnético quando comparada aos demais produtos, e isso se deve ao enriquecimento relativo de quartzo nas frações mais finas da areia reciclada.

A similaridade entre as composições químicas para o total calculado e o total obtido no ensaio para o intervalo -1,2+0,15 mm (Tabela 6.11) demonstra que as separações em rolos de terras raras foi eficiente mesmo em faixas mais amplas de granulometria, não justificando a separação em duas frações.

O produto não magnético representa de 50 a 70% da massa da amostra, com aumento para os finos devido à redução na proporção relativa de minerais máficos

magnéticos. Apresenta ainda enriquecimento de sílica se comparado ao produto magnético e redução expressiva de CaO+PF.

A separação em rolos de terras raras demonstra boa eficiência na concentração de fases ricas em ferro, alumínio, magnésio e pasta de cimento (indicada por CaO+PF) junto aos produtos magnéticos. Os maiores teores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ nos produtos magnéticos devem-se principalmente à presença de mica (portador de K) conforme demonstrado nos difratogramas comparativos dos produtos (Figura 6.27).

Figura 6.27 - Difratogramas comparativos de produtos da separação magnética em RE-Roll por fração granulométrica

Imagens representativas em microscópio estereoscópico ilustram a notória diferença composicional entre os produtos magnéticos e não magnéticos (Figura 6.28). O produto não magnético é composto basicamente por partículas de quartzo livres ou com pequena quantidade de pasta de cimento aderida, ao passo que o produto magnético concentra fases porosas ricas em pasta cimentícia, fragmentos cerâmicos, micas e minerais pesados.

Figura 6.28 - Imagens representativas de produtos da separação em RE-Roll por fração granulométrica

6.5.2.2 Ensaios em Re-Roll do produto britado

O estudo das separações do produto britado é particularmente interessante em função das restrições do equipamento na separação de materiais com granulações mais grossas e da demonstrada liberação das fases abaixo de 1,2 mm. O sumário dos resultados das separações em RE-Roll do produto britado (amostra composta VSI 65-75) são apresentados na Tabela 6.12 para três condições distintas de operação. A composição de todos os produtos obtidos é detalhada no APÊNDICE 9.

Tabela 6.12 - Sumário dos resultados de separação magnética em RE-Roll, PB -1,2+0,15 mm

Produtos RE-Roll	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição (%)				
		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	
Rotação 100rpm																
Mag	52,4	60,8	10,6	3,74	1,60	2,65	1,66	10,8	7,10	17,9	45,5	65,4	86,7	57,3	70,3	
NMag	47,6	80,1	6,17	0,63	1,29	2,19	0,60	4,60	3,72	8,32	54,5	34,6	13,3	42,7	29,7	
Total	100,0	70,0	8,50	2,26	1,45	2,43	1,16	7,84	5,49	13,3	100	100	100	100	100	
Rotação 110rpm																
Mag	44,3	57,7	11,0	4,47	1,50	2,59	1,88	11,7	7,96	19,7	36,7	58,4	83,2	48,6	63,7	
NMag	55,7	79,1	6,23	0,72	1,23	2,22	0,55	4,90	4,04	8,94	63,3	41,6	16,8	51,4	36,3	
Total	100,0	69,6	8,34	2,39	1,35	2,38	1,14	7,92	5,78	13,7	100	100	100	100	100	
Rotação 115rpm																
Mag	41,2	58,0	11,0	4,41	1,51	2,61	1,91	11,9	7,86	19,7	33,7	54,9	79,1	45,6	60,1	
NMag	58,8	80,0	6,35	0,82	1,24	2,20	0,56	4,98	4,18	9,16	66,3	45,1	20,9	54,4	39,9	
Total	100,0	70,9	8,27	2,30	1,35	2,37	1,12	7,81	5,70	13,5	100	100	100	100	100	

As curvas de separabilidade magnética comparativas do produto britado são apresentadas na Figura 6.29, enquanto os teores de SiO₂, Na₂O+K₂O e CaO+PF são comparados na Figura 6.30.

Figura 6.29 - Curvas de separabilidade magnética em Re-Roll do produto britado

Os resultados das separações do produto britado mostram que as diferentes rotações do rolo consideradas (100, 110 e 115 rpm) interferem principalmente na distribuição de massa dos produtos (variando de 47 a 59% no produto não

magnético), com pouca influência na composição química dos produtos (Tabela 6.12).

O produto não magnético, que representa de 47 a 59% em massa do ensaio, apresenta redução expressiva na somatória do teor de CaO com a PF (de 8 a 9% contra quase 20% nos produtos magnéticos), e enriquecimento de sílica (de 60 a 80% em média).

Figura 6.30 - Teores dos principais constituintes dos produtos das separações magnéticas RE-Roll do produto britado

Imagens representativas em microscópio estereoscópico ilustram a notória diferença composicional entre os produtos magnéticos e não magnéticos (Figura 6.31) de forma semelhante ao assinalado anteriormente para os produtos das separações por fração.

Figura 6.31 - Imagens representativas de produtos da separação em RE-Roll do produto britado

6.5.3 Conclusões sobre separações magnéticas

As fases ricas em pasta cimentícia (produtos flutuados em $2,5 \text{ g/cm}^3$) concentram-se majoritariamente no produto magnético, conforme demonstrado pelos estudos em separador Frantz de barreiras. Dessa forma, a susceptibilidade magnética demonstrou ser uma propriedade diferenciadora hábil na separação das fases com diferentes proporções de pasta de cimento.

Dos resultados das separações magnéticas por fração granulométrica em Frantz verificou-se um comportamento notadamente diferente das frações acima de 1,2 mm, indicando menor liberação entre as fases de rochas e a pasta de cimento.

Os resultados comparativos entre as separações em RE-Roll por fração granulométrica e do produto britado são sumarizados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Resultados comparativos dos produtos não-magnéticos das separações em RE-Roll por fração granulométrica e do produto britado

Fração (mm)	Massa (%)		ME (g/cm ³)	Teores (%)							Distribuição ensaio (%)				
	ensaio	amostra		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	Na ₂ O +K ₂ O	CaO +PF
-1,2+0,15															
Não-Mag	59,3	30,8	2,53	82,3	4,96	1,03	0,87	1,89	0,37	7,57	67,3	42,0	25,1	52,0	35,3
PB -1,2+0,15 (115 rpm)															
Não-Mag	58,8	42,8	2,56	80,0	6,35	0,82	1,24	2,20	0,56	9,16	66,3	45,1	20,9	54,4	39,9

Os resultados obtidos para os ensaios por fração granulométrica e do produto britado são similares, no entanto, a fração entre 1,2 e 0,15 mm representa apenas 52% em massa da amostra composta VSI 65-75 enquanto o mesmo intervalo no produto britado representa 73% da amostra. Dessa forma, as distribuições em massa nos produtos não-magnéticos são, respectivamente, 30,8% e 42,8%. Assim, a cominuição abaixo de 1,2 mm passa a ser uma opção interessante para a melhoria da qualidade do agregado miúdo reciclado.

Separações em líquidos densos (em $2,60 \text{ g/cm}^3$) dos produtos das separações em RE-Roll (Tabela 6.14) confirmam que o produto não magnético (menores teores de $\text{CaO}+\text{PF}$ - Tabela 6.11 e Tabela 6.12), apresentam também maior proporção de material em $d>2,6$ do que os produtos magnéticos, ou seja, menor conteúdo de fases porosas (como a pasta de cimento).

Comparando-se os resultados da fração tal qual e do produto de britagem, verifica-se que o produto britado não magnético apresenta maior proporção de material em $d>2,6$ do que o produto tal qual (68,5 e 61,1%, respectivamente), indicando menor conteúdo de fases porosas, maior quantidade de minerais pesados, ou a combinação de ambos os fatores. Esse comportamento ocorre em função da liberação das fases proporcionada pela britagem da fração entre 3,0 e 2,0 mm.

Tabela 6.14 - Resultado da separação em líquido denso dos produtos do RE-Roll

Massa (%)	Tal Qual -1,2+0,15 (100 rpm)		Produto britado -1,2+0,15 (100 rpm)	
	Magnético	Não-Magnético	Magnético	Não-Magnético
Produto $d>2,6$	37,1	61,1	39,9	68,5

6.6 CONCLUSÕES PARCIAIS SOBRE O BENEFICIAMENTO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO

Os principais resultados obtidos no processamento de resíduos de construção e demolição da amostra da Urbem são sumarizados na Tabela 6.15, sendo a relação de teores de $\text{CaO}+\text{PF}$ pelas respectivas recuperações na amostra apresentada na Figura 6.32.

Tabela 6.15 - Propriedades dos principais produtos obtidos no beneficiamento do agregado miúdo reciclado

Produto / fração	Massa (%)			Poros (%)	Teores (%)					Distrib. ensaio (%)		
	amostra	ensaio	d>2,6		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O	CaO+PF	SiO ₂	Na ₂ O+K ₂ O	CaO+PF
-3,0+0,15mm												
RCD-areia	35	85	32	19	71,4	7,06	2,39	2,75	14,2	89	87	72
VSI-55	81	81	49	12	70,0	7,93	2,53	3,57	14,2	86	85	68
VSI-65	79	79	55	11	70,8	8,18	2,62	3,79	13,5	84	82	63
VSI-75	79	79	55	10	69,8	8,71	2,72	3,96	13,6	84	83	66
Atrição 1.200 rpm	76	76	-	9,0	69,2	8,46	2,43	4,01	12,9	81	81	60
Atrição 1.700 rpm	72	72	-	7,0	71,8	7,79	2,23	3,78	12,0	78	74	52
VSI-75 d>2,5 g/cm ³	59	75	70	5,6	72,7	8,47	3,56	2,66	7,97	79	83	46
Frantz - NãoMag	47	60	-	6,5	75,4	5,78	1,88	3,08	11,6	66	46	52
-2,0+0,15 mm												
Elutriação - Pesado	53	80	57	7,9	75,3	7,11	2,41	3,47	9,68	83	81	64
Mesa - Pesado	48	73	61	7,5	74,6	7,38	2,23	3,65	10,1	76	75	57
-1,2+0,15 mm												
RE-Roll - NãoMag	31	59	61	6,5	82,3	4,96	1,03	2,76	7,57	67	52	35
PB -1,2+0,15 mm												
Mesa - Pesado	54	74	60	7,6	73,0	7,51	2,55	3,66	11,1	77	77	61
RE-Roll - NãoMag	44	60	69	6,0	80,0	6,35	0,82	3,44	9,16	66	54	40

Nota: Poros: porosidade por porosimetria com intrusão de mercúrio; frações >0,6 mm; atrição: produtos obtidos a 12 minutos de atrição;

Figura 6.32 - Distribuição em massa na amostra para produtos com diferentes conteúdos de CaO+PF

Ressalta-se que os estudos no produto britado abaixo de 1,2 mm foram justificados pela maior liberação da pasta cimentícia abaixo dessa granulometria como também para melhor adequação da distribuição de tamanho das partículas à faixa de operação da mesa oscilatória e do separador magnético de rolos de terras raras. Para a separação em elutriação e mesa oscilatória por fração granulométrica foi considerado somente o intervalo abaixo de 2,0 mm por limitações operacionais na separação em frações granulométricas maiores.

A areia presente no RCD após britagem secundária (TQ-areia) tem 85% de sua massa no intervalo -3,0+0,15 mm com uma proporção de material acima de 2,6 g/cm³ de 32% e uma distribuição de CaO+PF de 72% no ensaio. A porosidade deste produto é significativamente maior (19%) do que as areias do VSI (cerca de 10%), e destaca-se pelos elevados teores de CaO+PF mesmo com baixas distribuições (Figura 6.32).

Os produtos do VSI (de 79 a 81% em massa) apresentam proporções de material em $d > 2,6$ g/cm³ de 49% para VSI-55 e 55% para VSI-65 e VSI-75 associado a uma distribuição de 63 a 68% de CaO+PF. A velocidade do rotor do VSI demonstrou discreta influência na porosidade dos agregados miúdos reciclados, variando de 10 a 12% com valores crescentes para as menores rotações.

A atrição reduziu a recuperação em massa na fração $> 0,15$ mm de 79% a 72%, com redução de cerca de 10% no conteúdo de pasta de cimento remanescente (distribuição de CaO+PF nos produtos gerados). Nota-se também uma redução de porosidade dos produtos da atrição em comparação às areias do VSI, e que quanto mais intensa a condição de atrição (de 1.200 para 1.700 rpm), maior a redução da porosidade. Ou seja, a atrição provocou a desagregação seletiva da pasta de cimento porosa e de maior fragilidade.

A separação em líquido denso em 2,5 g/cm³ gerou um produto afundado que representa 75% em massa da amostra com apenas 46% do total de CaO+PF do total para o intervalo granulométrico considerado. Este produto caracteriza-se pela baixa porosidade (5,6%) demonstrada também pela elevada proporção de material acima de 2,6 g/cm³ (70%).

Resultados similares foram obtidos na separação densitária por elutriação por faixas estreitas de tamanho de partículas (de 2,0 a 0,15 mm). O produto pesado, representando 80% em massa, com 57% de material acima de 2,6 g/cm³, e porosidade de 7,9% e recuperação de 6% do total de CaO+PF.

A concentração em mesa oscilatória Wilfley (de 2,0 a 0,15 mm) mostrou seletividade na separação por densidade tanto para intervalos granulométricos estreitos quanto para a amostra composta em intervalos mais amplos e também para o produto de britagem. Os produtos pesados (73 e 74% em massa) apresentaram cerca de 60% de massa de material afundado em 2,6 g/cm³, com porosidade média de 7,5% associado a uma recuperação de CaO+PF de 57% (por fração granulométrica) e 61% (produto britado).

As separações em separadores magnéticos Frantz de barreiras ou em RE-Roll geraram um produto não-magnético (média de 60% em massa) de menor porosidade (6,5%) e elevada proporção de material afundado em 2,6 g/cm³ (61 a 69% em massa) reduzida recuperação de CaO+PF (de 35 a 40% para o RE-Roll e 52% para o Frantz).

Os resultados comparativos dos principais produtos obtidos demonstram que as separações magnéticas em RE-Roll geram um produto não-magnético com os menores teores e recuperações de CaO+PF e os maiores teores de sílica. Apresentam, ainda, a vantagem de não utilizarem água para a separação.

Das alternativas consideradas, a separação em líquido denso a 2,5 g/cm³ foi a que demonstrou mais eficiência na obtenção de um produto com menor conteúdo de CaO+PF (teor de 8% e distribuição de 46%) com recuperação de massa de 75%. No entanto, este procedimento é empregado em rotinas de caracterização tecnológica para avaliação do potencial máximo de separação do material, não sendo utilizada em escalas de processos devido aos elevados custos e às dificuldades ambientais associadas ao manuseio destes líquidos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 SUMÁRIO DOS RESULTADOS

A análise granulométrica da amostra tal qual (britada abaixo de 19 mm) mostra que cerca de 50% da amostra tem granulometria de agregado miúdo (<4,8mm), sendo 40% abaixo de 3,0 mm dos quais 16% estão abaixo de 0,15 mm. Os principais constituintes químicos das frações acima de 0,15 mm são: sílica, óxido de cálcio, alumina e óxido de ferro, que, juntamente com a perda ao fogo, ultrapassam 90% dos teores nas amostras; elementos menores são Na_2O , K_2O e MgO .

A composição química está fortemente relacionada com a fração granulométrica; acima de 2,0 mm verifica-se maior proporção relativa de feldspato e no intervalo entre 2,0 mm e 0,15 mm maior conteúdo de quartzo; a fração abaixo de 0,15 mm difere dos demais produtos à medida que apresenta aumento considerável nos teores de $\text{CaO}+\text{PF}$ e redução de sílica.

A britagem terciária em VSI abaixo de 3,0 mm gera um produto com cerca de 20% de material abaixo de 0,15 mm. A comparação entre a areia de RCD e o produto do VSI mostra que a cominuição total do RCD em agregados miúdos gera um produto enriquecido em aluminossilicatos (feldspatos, principalmente) em virtude da incorporação dos agregados graúdos britados (rochas ricas em feldspato).

A areia produzida pela britagem em VSI apresenta cerca da metade da porosidade verificada para a fração areia da amostra tal qual. A análise da morfologia das partículas indicou que o VSI gera um produto com partículas com maior esfericidade em relação à areia originalmente presente no resíduo.

Os resultados comparativos entre as areias do VSI indicam que a velocidade de rotação do rotor exerce uma influência sutil nos parâmetros avaliados, tais como na proporção relativa entre quartzo e outros silicatos, distribuição de $\text{CaO}+\text{PF}$ nas frações acima de 0,15 mm, absorção de água, porosidade e proporção de material

afundado em $2,6 \text{ g/cm}^3$. Os resultados das velocidades de 65 e 75 m/s foram semelhantes.

As separações sequenciais em líquido denso por fração granulométrica (de 3,0 a 0,15 mm) demonstraram que a composição dos produtos, a proporção de pasta cimentícia e a porosidade dos agregados estão intimamente relacionadas com a densidade dos produtos. Comprovou ainda aumento de liberação entre os silicatos e a pasta de cimento nas frações abaixo de 1,2 mm. O produto afundado em $2,5 \text{ g/cm}^3$ (75% em massa para o total -3,0+0,15 mm) apresenta empobrecimento de CaO+PF (teor médio de 7,8%) com recuperação média de cerca de 80% do total de sílica, alumina, óxido de ferro e $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ contidos e remoção de cerca de 55% do total de CaO+PF.

A caracterização das associações por MEV-MLA permitiu quantificar as principais fases que compõem os agregados miúdos reciclados: quartzo, feldspato e pasta de cimento; em menores proporções foram identificadas micas, minerais máficos e partículas de calcita e dolomita. Carbonatos concentram-se no produto afundado em $2,64 \text{ g/cm}^3$ (teores de 8 a 11%), o que significa que a solubilização parcial por HCl a 33% ou a soma CaO+PF superestima o teor real de pasta de cimento em produtos pesados.

A robustez e confiabilidade nos resultados e no procedimento estabelecido foi demonstrado pela estreita correlação entre as proporções de fases e a composição química (pasta+carbonatos x CaO+PF e feldspatos x $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$). Adicionalmente, as associações das fases determinadas por MEV-MLA confirmaram os resultados das separações em líquidos densos (maior liberação nas frações abaixo de 1,2 mm).

Os estudos de separabilidade nos agregados miúdos demonstraram que a densidade e a susceptibilidade magnética são propriedades diferenciadoras entre agregados miúdos enriquecidos em quartzo e partículas porosas ricas em pasta cimentícia, fragmentos cerâmicos, micas e minerais pesados. Além disso, a pasta remanescente pode ser parcialmente removida por atrição.

Os produtos obtidos por métodos densitários representam de 70 a 80% em massa no ensaio; para os produtos não magnéticos esse valor é de 60% em virtude da concentração dos minerais ferromagnesianos junto ao produto magnético.

Cabe ressaltar as etapas de concentração em equipamentos contínuos de processamento mineral, mesa oscilatória e RE-Roll, demonstraram a eficiência evidenciada pelos estudos de separabilidade. No entanto, a concentração em espiral apresentou segregação por tamanho de partículas, não sendo seletiva para a concentração por densidade no intervalo granulométrico considerado.

Os produtos pesados como também os não magnéticos apresentam teores de CaO+PF, da ordem de metade em relação aos respectivos produtos leve ou magnéticos.

Dessa forma pode-se concluir que operações unitárias de tratamento de minérios podem ser utilizadas para a redução do conteúdo de partículas porosas ricas em pasta de cimento ainda remanescentes nos agregados miúdos reciclados.

7.2 CONCLUSÕES

Dos resultados dos estudos de produção e separabilidade de agregados miúdos reciclados, têm-se como principais conclusões:

- A produção de agregado graúdo (<19 mm) a partir da britagem de RCD gera uma parcela expressiva de material na granulometria de agregados miúdos (<4,8 mm, 50% em massa);
- A cominuição integral dos resíduos de construção por britagem terciária em equipamento de impacto vertical (VSI), abaixo de 3,0 mm, comprovou ser eficiente na produção de uma areia reciclada com menor porosidade e com partículas de maior esfericidade em relação à areia originalmente presente no RCD ou gerada pelo produto da britagem secundária;
- A rotação do rotor do VSI gerou produtos com semelhantes distribuições granulométricas e morfologia das partículas; no entanto os produtos gerados na velocidade de 65 e 75 m/s apresentaram menores porosidades e absorção de água;
- As composições químicas e mineralógicas demonstraram enriquecimento expressivo de aluminossilicatos na areia do VSI devido à incorporação do agregado graúdo rico em feldspato;

- O produto do VSI apresenta redução expressiva na distribuição de CaO+PF, sem geração excessiva de finos, indicando cominuição seletiva da pasta cimentícia porosa;
- A caracterização das associações por MEV-MLA mostrou-se uma ferramenta robusta que permite avaliar a associação entre as fases presentes e tem particular habilidade em distinguir pasta de cimento de carbonatos;
- A atrição, após britagem por VSI, promoveu a desagregação seletiva da pasta de cimento porosa e de maior fragilidade;
- Os estudos de separabilidade demonstraram que a densidade e a susceptibilidade magnética são propriedades diferenciadoras entre agregados miúdos enriquecidos em quartzo e partículas porosas ricas em pasta cimentícia, fragmentos cerâmicos, micas e minerais pesados;
- Separações em líquidos densos e em RE-Roll demonstraram que a liberação aumenta nas frações abaixo de 1,2 mm;
- Separações densitárias por elutriação demonstraram que separações por fluxo de água ascendente podem ser promissoras para a remoção das fases porosas e minerais placoides;
- A concentração em mesa vibratória foi eficiente na separação de partículas com diferentes densidades, mesmo em intervalos granulométricos mais amplos;
- A concentração em espiral demonstrou segregação dos produtos por tamanho de partículas, não sendo eficiente na concentração por densidade;
- Separações magnéticas em equipamento Frantz de barreiras demonstraram que produtos enriquecidos em pasta cimentícia porosa (flutuados em 2,5 g/cm³) apresentam maior susceptibilidade magnética;
- Separações em RE-Roll demonstraram eficiência na separação, mesmo em intervalos granulométricos mais amplos;

As principais dificuldades e recomendações em relação aos estudos desenvolvidos podem ser sumarizadas como:

- A ausência de procedimentos de caracterização foi a maior dificuldade encontrada para a avaliação das propriedades de agregados miúdos reciclados e eficiência dos processos de beneficiamento;
- A produção de areia reciclada por britador de impacto vertical (VSI) foi selecionada dada a comprovada habilidade do equipamento na produção de areia de brita. Outro equipamento poderia ser considerado principalmente na avaliação da liberação entre as fases minerais das rochas e a pasta de cimento;
- Os estudos de separabilidade em escala laboratorial mostraram eficiência na remoção de partículas porosas ricas em pasta cimentícia, no entanto a concentração em espiral não foi eficiente. A concentração em espiral poderia ser reavaliada conforme nos mesmos intervalos granulométricos da concentração em mesa ou em espirais com diferentes perfis;
- Tendo em vista que a liberação aumenta abaixo de 1,2 mm, estudos em escala piloto ou semi-industrial devem considerar uma cominuição mais fina do que os 3 mm realizados no presente trabalho;
- A análise econômica e do ciclo de vida dos agregados e de CO₂ não foram abordadas e devem ser realizadas para diferentes alternativas de processamento. Deve-se considerar que a matéria-prima da usina de reciclagem, sendo um resíduo, gera uma receita positiva (a usina cobra pelo recebimento do resíduo). Além disso, as distâncias de transporte e a logística para maximização da utilização de caminhões (ida e volta carregados) são decisivas na viabilidade do empreendimento;
- A caracterização dos produtos foi importante para avaliar as propriedades do agregado produzido, no entanto estudos de desempenho de produtos (argamassa ou concretos) devem ser realizados.

Em um contexto mais amplo, o desenvolvimento e implantação de usinas de produção de areia a partir de resíduos de construção e demolição contribuem com os seguintes aspectos:

- As distâncias de transporte, parâmetro decisivo no preço de agregados, podem ser significativamente reduzidas, visto que as usinas recicladoras podem ser instaladas próximas aos centros consumidores. Essa medida impacta diretamente na redução das emissões de CO₂ (transporte por caminhões), redução de tráfego de veículos pesados e menor desgaste de pavimentos;
- Os benefícios da reciclagem estendem-se ao aumento da vida útil de jazidas de matérias-primas não renováveis, redução da extração ilegal de areia e das deposições ilegais de resíduos e aumento da vida útil dos aterros de inertes;
- A utilização dos agregados finos é determinante para a ampliação das taxas de reciclagem de RCD;
- A viabilização da reciclagem de RCD está alinhada com a política internacional de desenvolvimento sustentável e preservação ambiental. É uma alternativa tecnicamente viável e colabora com o desenvolvimento econômico, fundamental para o avanço produtivo do país.

7.3 ESTUDOS COMPLEMENTARES

O presente estudo não esgota todas as alternativas para o beneficiamento do agregado miúdo reciclado. Peneiramento com jato de água de alta pressão, (Hidroclean, marca Haver), separação densitária por fluxo de água ascendente (Floatex density separator, Outotec) e classificação granulométrica a seco (classificador Sturtevant), serão avaliados como parte do projeto MCT-CNPq, n. 550437/2010-0 (equipamentos em aquisição) na redução do conteúdo da pasta de cimento e na remoção dos finos por classificação pneumática.

Adicionalmente, foi iniciado um estudo de desempenho reológico de argamassas formuladas com os agregados miúdos reciclados produzidos pela britagem em VSI e com produtos obtidos das etapas de beneficiamento. Inicialmente foram consideradas argamassas com areias de distribuição granulométrica similar para avaliação da influência da morfologia e da porosidade do agregado miúdo reciclado na mistura. O desempenho destas argamassas no estado fresco foi

avaliado por reometria rotacional; no estado endurecido foi avaliado o módulo de elasticidade, a resistência mecânica a tração por compressão diametral e a porosidade dos corpos-de-prova.

Foram avaliadas duas condições distintas de mistura: a) com conteúdo de água fixo para todas as misturas, b) com teor de água ajustado para que as argamassas apresentassem condições de trabalhabilidade semelhantes. O sumário do procedimento experimental e dos resultados já obtidos é apresentado no APÊNDICE 10.

Posteriormente os estudos deverão considerar também uma distribuição granulométrica otimizada visando a redução do consumo de cimento. Os desempenhos serão comparados aos de argamassas industrializadas comerciais; a competitividade das areias obtidas por diferentes processos será medida através do consumo de cimento, do comportamento reológico, da retração e do teor de ar incorporado.

A partir dos resultados do processamento e dos estudos comparativos de desempenho das argamassas será(ão) selecionada(s) a(s) alternativa(s) de processo para a próxima etapa dos estudos em escala semi-contínua, objeto de estudo a ser realizado em convênio já estabelecido com a Universidade de São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas: *NBR-9937: Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo*. 1987.

_____: *NBR-NM-30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. 2001.

_____: *NBR-15.116: Agregados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos*., 2004.

_____: *NBR-7211: Agregados para concreto - Especificação*. 2005a.

_____: *NBR-9935: Agregados - Terminologia*. 2005b.

_____: *NBR-7809: Versão Corrigida - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio*. 2008.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. O desafio da sustentabilidade na construção civil. São Paulo: Blucher, 2011. 141 p.

AHN, J. W.; KIM, H. S.; HAN, G. C. Recovery of aggregate from waste concrete by heating and grinding. *Geosystem Engeneering*, v. 4, n. 4, p. 123-129, 2001.

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement & Concrete Composites*, v. 24, n. 2, p. 269-279, 2002.

ALLEN, T. Particle size measurement: Powder sampling and particle size measurement. 5. London: Chapman & Hall, 1997. 525 p.

ANCIA, P. et al. The use of mineral processing techniques for the improvement of the building rubble characteristics. *Rewas'99 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology Volume I-iii*, p. 583-596, 1999.

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

ANGULO, S. C. et al. Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from Sao Paulo, Brazil. *Waste Management*, v. 29, n. 2, p. 721-730, 2009.

ANGULO, S. C. et al. Quality upcycling of mixed CDW coarse recycled aggregates (no prelo). In: *2nd International Symposium on sustainability through resource conservation & recycling*, 2011. Falmouth, UK. **Proceedings**. Falmouth, UK: 2011.

ANGULO, S. C. et al. Processamento de resíduos de construção e demolição em usinas de reciclagem européias. In: *Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção*, 2009b. Porto Alegre. **Proceedings**. Porto Alegre: 2009b.

BARBERY, G. Mineral Liberation : Measurement, Simulation and Practical use in Mineral Processing. Pennsylvania: Les Editions GB, 1991. 351 p.

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.

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

_____. Modelling of output and power consumption in vertical shaft impact crushers. *International Journal of Mineral Processing*, v. 88, n. 1-2, p. 18-23, 2008.

BIANCHINI, G. et al. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. *Waste Management*, v. 25, n. 2, p. 149-159, 2005.

BISH, D. L.; POST, J. E. Modern powder diffraction. Washington: Mineralogical Society of America, 1989.

BREUER, H. Gravity Separation of Rubble - a Contribution to the Closed Cycle of Raw Material Usage. In: *International Mineral Processing Congress*, 1997. Aachen. **Proceedings**. Aachen: GMD, 1997. p. 445-456.

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

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS:812 - Testing aggregates* 1990.

_____. *BS EN 12620:2002+A1:2008 Aggregates for concrete*. STANDARD, B. B. 2002.

BUNTENBACH, S. Wet processing of demolition rubble. *Aufbereitungs-Technik*, v. 38, n. 3, p. 130-138, 1997.

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.

CALLISTER, W. D. Fundamentals os materials science and engineering. Wiley, 2000.

CARNEIRO, A. et al. Construction waste characterisation for production of recycled aggregate--Salvador/Brazil. *Waste Management Series*, v. 1, p. 825-835, 2000.

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

CASTRO, A.; PANDOLFELLI, V. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

CHAUVIN, W. J. Quantitative energy dispersive X-ray microanalysis. In: *Short Course in Applications of Electron Microscopy in the Earth Sciences*, 1985. Mineralogical Association of Canada, 1985. p. 189-213.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. Britagem, peneiramento e moagem. 3. São Paulo: Editora Signus, 2006. 250 p.

CHAYES, F. Petrographic modal analysis. New York: John Wiley, 1956. 113 p.

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.

CHINI, A. R. et al. Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, v. 127, n. 6, p. 486-492, 2001.

COSTA, M. R. M. M. *Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos*. 2006. 131 p. Tese (Doutorado) - Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CULLITY, B. D. Elements of X-ray diffraction. 2. Reading, MA: 1978.

CUNHA, E. R. Produção de areia manufaturada em usina piloto. In: *II SUFFIB – o uso da fração fina da britagem*, 2005. 2005.

CUNHA, E. R.; ALMEIDA, S. L.; TAVARES, L. M. M. Desempenho do classificador pneumático Sturtevant na produção de areia artificial. In: *XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2004. Florianópolis. **Proceedings**. Florianópolis: 2004.

D'AGOSTINO, L. Z. *Uso de finos de pedreira no preparo de argamassas de assentamento*. 2004. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DAMINELLI, B. L. *Estudo de Métodos para Caracterização de Propriedades Físicas de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados*. 2007. 125 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DAVISON, J. J. Masonry mortar. *Canadian Building Digest*, Ottawa, Nacional Research Council of Canada, p. 163, 1974.

DE BRITO, J.; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement & Concrete Composites*, v. 27, n. 4, p. 429-433, 2005.

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.

DEBIEB, F. et al. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 11, p. 3382-3387, 2009.

DIAS, J. F.; AGOPYAN, V. *Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo*. 2005. Dissertação (Boletim Técnico) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 4226-100: aggregates for mortar and concrete – part 100: recycled aggregates*. (DIN), D. I. F. N. Germany 2002b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Anuário Mineral Brasileiro*. MINERAL, D. N. D. P. Brasil: DNPM 2006.

DUNLEVEY, J. N. Modal analysis by computer assisted point counting. In: *International Congress on Applied Mineralogy 3*, 1991. Petroria. **Proceedings**. Petroria: 1991.

DUTRA, C. V.; GOMES, C. B. A fluorescência de raios X na geologia. In: GOMES, C. B. (Ed.). *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Blucher/Pró-Minério, 1984. 84-158 p.

ETXEBERRIA, M.; MARI, A. R.; VAZQUEZ, E. Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, v. 40, n. 5, p. 529-541, 2007.

ETXEBERRIA, M.; VAZQUEZ, E.; MARI, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, v. 58, n. 10, p. 683-690, 2006.

ETXEBERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007.

EUROPEAN COMMISSION. *Management of construction and demolition waste*. <<http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment>>. DG ENV E.3 2000.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *The European Environment - State and Outlook 2010*. Copenhagen. 2010

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.

EWING, G. W. Métodos instrumentais de análise química. 1. 1972.

FANDRICH, R. et al. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *International Journal of Mineral Processing*, v. 84, p. 310-320, 2007.

FERRAZ, G. R. *Estações de classificação e transbordo na cidade de São Paulo*. In: *Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, 2001. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: IBRACON/IPEN, 2001. p. 75-86.

FORMOSO, M. L. L. Difractometria de raios-X. In: GOMES, C. B. (Ed.). *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Blucher/Pró-Minério, 1984. 1-43 p.

GAUDIN, A. M. Principles of mineral dressing. New York: MacGraw-Hill, 1932.

GOLDSTEIN, J. et al. Scanning electron microscopy and X-ray analysis. 2. New York: Plenum Press, 1992. 689 p.

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.

GRESS, D. L.; SNYDER, M. B.; STURTEVANT, J. R. Performance of rigid pavements containing recycled concrete aggregates. *Transport Research Record*, v. 2113, p. 99-107, 2009.

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

HANISCH, J. Current developments in the sorting of building waste. *Aufbereitungs-Technik*, v. 39, n. 10, p. 485-492, 1998.

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.

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

_____. A new vision on the building cycle. Holanda: Aeneas, 2004. 251 p.

HIGA, R. A. T. *Concentração de minerais traços para mineralogia quantitativa*. 2009. 28 p. Dissertação (Trabalho de Formatura) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; SJÖSTRÖM, C. *On agenda 21 for Latin America and Caribbean construbusiness - a perspective from Brazil*. Paper accepted by Building Research and Information 2001.

JOHN, V. M. et al. Strategies for innovation in construction and demolition waste management in Brazil. In, 2004. 2004.

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

JONG, T. P. R.; FABRIZI, L. Dry separation of mixed construction and demolition waste. *Recycling International*, p. 24-27, 2004.

JUAN, M. S. *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. 2004. 502 p. Tese (Doctorado) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

JUNGSMANN, A. et al. Building rubble treatment using the alljig in Europe and USA. *Aufbereitungs technik*, v. 38, n. 3, p. 543-549, 1997.

JUNGSMANN, A.; QUINDT, J. alljig (R) - Technology for separation of building rubble and other secondary raw materials. *Rewas'99 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology Volume I-II*, p. 367-379, 1999.

KAHN, H.; MANO, E. S.; TASSINARI, M. M. L. Image analysis coupled with a SEM-EDS applied to the characterization of a Zn-Pb partially weathered ore. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, v. 1, p. 1-9, 2002.

KELLERWESSEL, H. Jigs and their particular application for recycling - Possibilities, limits, types. *Aufbereitungs technik*, v. 34, n. 10, p. 521-530, 1993.

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

KISS, L.; SCHONERT, K. Liberation of two component material by single particle compression and impact crushing. *Aufbereitungs-Technik*, 1980.

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.

KOGA, Y. et al. A process for separating aggregate from concrete waste during the dismantlement of nuclear power plants. *Radioactive Waste Research*, v. 3, n. 2, p. 17-26, 1997.

KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. *Optimizing the use of RCA* 2000.

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.

KROPP, J. *Bestimmung der Kernfeuchte wassergesättigter: Bauschuttzyklate anhand des Trocknungsverhaltens*: Amtliche Materialprüfungsanstalt Bremen: 12 p. 2005.

KYHARA, Y. The influence of carbonation of the alkali-aggregate reaction mechanism. In: *INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT*, 1997. 1997. p. 331-334.

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

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.

LASTRA, R.; PETRUK, W. Image analysis technique and applications to mineral processing. In: *Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy*, 1998. Ottawa. **Proceedings**. Ottawa: 1998. p. 327-366.

LEE, H. et al. Application of DEM model to breakage and liberation behaviour of recycled aggregates from impact-breakage of concrete waste. *Minerals Engineering*, v. 21, n. 11, p. 761-765, 2008.

LEITE, F. et al. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, p. 2972-2979, JUN 2011 2011.

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

LEVY, S. M. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. 2001. 199 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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.

LI, G. Y.; XIE, H. C.; XIONG, G. J. Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders. *Cement & Concrete Composites*, v. 23, n. 4-5, p. 381-387, 2001.

LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 3, p. 1287-1291, 2009.

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, v. 33, n. 233, p. 574-580, 2000.

LIMBACHIYA, M. C.; MARROCCHINO, E.; KOULOURIS, A. Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*, v. 27, n. 2, p. 201-208, 2007.

LINDQVIST, M. Energy considerations in compressive and impact crushing of rock. *Minerals Engineering*, v. 21, n. 9, p. 631-641, 2008.

LINSS, E.; MUELLER, A. High-performance sonic impulses - an alternative method for processing of concrete. *International Journal of Mineral Processing*, v. 74, p. S199-S208, 2004.

LIST, J.; KÖHLER, U.; WITT, W. Innovations in Dynamic Image Analysis: down to 1 μm In: *World Congress on Particle Technology (WCPT6)*, 2010. Nuremberg, Germany. **Proceedings**.Nuremberg, Germany: SPE, 2010.

LO, Y.; GAO, X. F.; JEARY, A. P. Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete. *Building and Environment*, v. 34, n. 6, p. 759-764, 1999.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. 4. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004.

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.

MASS, G. R. Aggregate particle shape considerations, (Harza Engineering Co., Chicago, IL, USA). *Concrete International: Design and Construction*, v. 5, p. 23-29, 1983.

MESTERS, K.; KURKOMSKI, H. *Density separation of recycling building materials by means of jig technology*. *Aufbereitungs technik*, n. 38, p. 536-542, 1997.

MILLER, J. D.; LIN, C. L. Three-dimensional analysis of particulates in mineral processing systems by cone beam X-ray microtomography. *Minerals & Metallurgical Processing*, v. 21, n. 3, p. 113-124, 2004.

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.

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

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. *Ambiente Construído*, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MOSKALA, R.; SCHNEIDER-KUHN, U. *Wet processing, the indispensable alternative for processing of demolition debris*. In: *International Mineral Processing Congress*, 1997. Aachen. **Proceedings**. Aachen: GMDB, 1997. p. 471-478.

MUELLER, A. Recycling of masonry rubble: status and new utilization methods – Part 1. *Ziegelindustrie International*, v. 56, p. 17-25, 2003.

MULAR, A. L.; HALBE, D. N.; BARRATT, D. J. Mineral processing plant design, practice and control proceedings. Society for Mining Metallurgy, 2002.

MULDER, E.; DE JONG, T. P. R.; FEENSTRA, L. Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Management*, v. 27, n. 10, p. 1408-1415, 2007.

NAGATAKI, S.; GOKCE, A.; SAEKI, T. Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete. In: *Proceedings of the fifth canmet/ACI international conference on durability of concrete*, 2000a. Barcelona. **Proceedings**. Barcelona: 2000a. p. 51-71.

NAGATAKI, S. et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 6, p. 965-971, 2004.

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.

NUNES, K. R. A. et al. Evaluation of investments in recycling centres for construction and demolition wastes in Brazilian municipalities. *Waste Management*, v. 27, p. 1531-1540, 2007.

OLIVEIRA, I. R. et al. Dispersão e empacotamento de partículas - princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico. Fazendo Arte Editorial, 2000.

PARFENOFF, A.; POMEROL, C.; TOURENQ, J. *Les minéraux en grains; méthodes d'étude et détermination*. 6. Paris: Dunod, 1970.

PEDROZO, P.; LEITE, M.; DAL MOLIN, D. Technical viability study of the use of construction and demolition waste to concrete production. In, 2000. 2000.

PETRUUK, W. Short Course on Image Analysis Applied to Mineral and Earth Sciences. Ottawa: Mineral Association of Canada, 1989. 156 p.

_____. Measurements of mineral liberation in connection with mineral beneficiation. In: *Process Mineralogy IX*, 1990. The Minerals, Metals & Materials Society, 1990. p. 31-36.

_____. Applied Mineralogy in the Mining Industry. 1. Elsevier Science, 2000.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Reflexões sobre distribuição granulométrica e sua correlação com a reologia de concretos refratários. *Ceramic News, Special South America*, p. 6-13, 1999.

_____. Reologia e distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis. *Cerâmica*, v. 48, p. 11-16, 2002.

PINTO, T. P. *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. 1999. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

POON, C. S. Management of construction and demolition waste. *Waste Management*, v. 27, n. 2, p. 159-160, 2007a.

_____. Reducing construction waste. *Waste Management*, v. 27, p. 1715-1716, 2007b.

POON, C. S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources Conservation and Recycling*, v. 50, n. 3, p. 293-305, 2007.

POON, C. S.; CHAN, D. X. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, v. 20, n. 8, p. 569-577, 2006.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, v. 16, n. 5, p. 281-289, 2002.

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.

POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, p. 31-36, 2004.

POTAPOV, A. V.; CAMPBELL, C. S. COMPUTER-SIMULATION OF IMPACT-INDUCED PARTICLE BREAKAGE. *Powder Technology*, v. 81, n. 3, p. 207-216, 1994.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEIXO, D. M. *Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassas endurecidas*. In: *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 2003. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: ANTAC, 2003. p. 647-662.

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.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, v. 42, n. 1, p. 407-415, 2007.

RAKSHVIR, M.; BARAI, S. V. Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research*, v. 24, n. 3, p. 225-233, 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.

RILEM RECOMMENDATION. Specification for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, v. 27, p. 557-59, 1994.

RUSS, J. C. Practical stereology. Plenum, 1986.

SABBATINI, F. H. *Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente*. 1986. 26 p. Dissertação (Boletim Técnico) - EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 5, p. 707-712, 2001.

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*. 1997. 29 p. Dissertação (Boletim técnico) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SCHUBERT, W.; KHANAL, M.; TOMAS, J. Impact crushing of particle-particle compounds - experiment and simulation. *International Journal of Mineral Processing*, v. 75, n. 1-2, p. 41-52, 2005.

SCHULTMANN, F.; RENTZ, O. The state of deconstruction in Germany. In: KIBERT, C. J. e CHINI, A. R., *CIB Publication 252*, 2000. Florida. **Proceedings**. Florida: 2000. p. 45-69.

SELMO, S. M. S. Agregados miúdos para argamassas de revestimento. In: *SIMPÓSIO NACIONAL DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: AGREGADOS*, 1986. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: 1986. p. 27-43.

SHIMA, H. et al. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 3, n. 1, p. 53-67, 2004.

SILVA, J.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Fine ceramics replacing cement in mortars Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars. *Materials and Structures*, v. 41, n. 8, p. 1333-1344, 2008.

STARK, U.; MUELLER, A. Optimization of packing density of aggregates. In: STURWALD, S.; SCHMIDT, M., *et al*, *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2008. Kassel. **Proceedings**. Kassel: Kassel university, 2008. p. 121-127.

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.

SUTHERLAND, D. N.; GOTTLIEB, P. Application of Automated Quantitative Mineralogy in Mineral Processing. *Minerals Engineering*, v. 4, p. 753-762, 1991.

TAGGART, A. F. *Handbook of mineral dressing*. New York: John Wiley & Sons, 1944.

TAM, V. W. Y. Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, n. 7, p. 688-702, 2009.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, p. 1195-1203, 2005.

TAM, V. W. Y. et al. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 3, p. 364-369, 2008.

TAM, V. W. Y.; WANG, K.; TAM, C. M. Assessing relationship among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials*, v. 152, n. 2, p. 703-714, 2008.

TOMAS, J. et al. Impact crushing of concrete for liberation and recycling. *Powder Technology*, v. 105, n. 1-3, p. 39-51, 1999.

TOMOSAWA, F.; NOGUCHI, T.; TAMURA, M. The way concrete recycling should be. *Journal of Advanced Technology*, v. 3, n. 1, p. 3-16, 2005.

TSENG, E. *Reciclagem de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: O caso do rodanel metropolitano Mário Covas*. 2010. 220 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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

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. *An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data*. Norcross: Micromeritics Instrument Corp. 2001.

WEBB, P. A.; ORR, C. Analytical Methods in Fine Particle Technology. 1 edition. Norcross, USA: Micromeritics Instrument Corporation, 1997. 301 p.

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

WILLS, B. A. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical aspects of Ore Treatment. 7. oxford: 2006b. 444 p.

WILSON, J. Recycling construction and demolition waste. The dutch experience. *Quarry Management*, p. 28-37, 1996.

WITT, W.; JOACHIM, L.; ULRICH, K. **Possibilities of Dynamic Image Analysis in the Laboratory and Process Environment**. In: *Particulate Systems Analysis*, 2008. Stratford-upon-Avon, UK. **Proceedings**. Stratford-upon-Avon, UK: 2008.

XING, W. Closing the cycle of building materials - recycling of construction and demolition waste by quality improvement. In: *International Conference on Sustainable Building*, 2002. Oslo. **Proceedings**. Oslo: 2002.

XING, W. et al. The quality improvement of stony construction and demolition waste (CDW). *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, p. 78, 2004.

XING, W. H. et al. Quality improvement of granular wastes - The effective way to recycle secondary raw building materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, v. 19, n. 4, p. 87-90, 2004.

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.

YANG, K. H.; CHUNG, H. S.; ASHOUR, A. F. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, v. 105, n. 3, p. 289-296, 2008.

APÊNDICE 1 - EQUIPAMENTOS DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS APLICADOS À RECICLAGEM DE RCD

Equipamentos de separação pneumática descritos por pesquisadores da Universidade de Tecnologia de Delft, Holanda (JONG e FABRIZI, 2004)

Jigue pneumático “Allair” (www.allmineral.com, modificada)

leito fluidizado de areia seca

mesa pneumática

classificador de velocidade horizontal

Equipamentos descritos por Buntenbach para remoção de materiais orgânicos em agregados (BUNTENBACH, 1997)

Aquamator

Fonte: Rohr Corporation, homepage do fabricante

Hydrodrum

Fonte: Anette Muller

Figura de apresentação proferida pela Prof. Anette Muller (arquivo pessoal)

APÊNDICE 2 - ÁREAS DE TRANSBORDO E TRIAGEM E USINAS DE RECICLAGEM DE RCD

Usina de reciclagem Urbem Tecnologia Ambiental

(a) detalhe do britador de impacto

(b) peneira de 2 decks

(c) remoção manual de contaminantes após britagem

(d) remoção manual de contaminantes antes da britagem

(e) pilha de produtos

(f) vista geral da usina

Usina de Itaquera, São Paulo

(a) britador de impacto

(b) extrator de metais

(c) peneiramento em peneira de 3 decks

(a) aterro a ser preenchido com RCD britado (foto de 2002)

(b) aterro preenchido com RCD britado (foto de 2007, revista Areia e brita)

Usina de Vinhedo, SP

(a) britador de mandíbulas e peneiramento

(b) detalhe da britagem e transportador de correia

(c) recebimento e triagem do resíduo

(d) triagem de materiais orgânicos

Usina "Estação Ecologia", região metropolitana de São Paulo

Material recebido

Remoção manual dos contaminantes presentes no material recebido

Britagem primária em britador de impacto

Britagem secundária em britador de mandíbulas

Remoção manual dos contaminantes após britagem primária

Remoção manual dos contaminantes após britagem secundária e peneiramento

Madeira

Plástico

Blocos confeccionados com os agregados produzidos

Vista geral da usina com silos de armazenamento dos produtos

Área de transbordo e triagem, região metropolitana de São Paulo

Área de recepção de material

Britador de mandíbulas

Peneiramento

Madeira

Outros contaminantes: plástico, papel

APÊNDICE 3 - PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS E OPERAÇÃO DO MEV/MLA

A análise de material particulado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) requer que estas sejam impregnadas por resina para confecção de seções polidas. O procedimento aplicado à caracterização dos resíduos foi adaptado dos métodos tradicionais utilizados na caracterização de matérias-primas minerais. Foram avaliadas diferentes resinas e optou-se pela resina epóxi Epofix da marca Struers com corante Epoxiglass verde-escuro, pois este conjunto permitiu distinguir as fases minerais presentes na amostra por cor quando observadas em lupa estereoscópica e não gerou carga em análise ao MEV.

Para cada seção foram utilizados 8,0 g de resina Epofix, 1,0 g de líquido endurecedor e 0,30 g de pigmento verde-escuro Epoxiglass (pesados em balança). Os componentes foram homogeneizados e dispostos em formas plásticas de fundo circular com diâmetro de 25 mm, até aproximadamente a metade do volume da forma. O material foi amostrado em amostrador rotativo (maior representatividade das alíquotas estudadas) é também despejado na forma de maneira aleatória de modo a formar uma única camada que cubra o fundo das formas.

Para a retirada de eventuais bolhas de ar presas na resina, as formas contendo resina+amostra foram submetidas à pressão de 3 a 4 bar durante 3 minutos para melhor impregnação da resina. O processo foi repetido por 4 vezes. Após o endurecimento da resina (cerca de 12 horas), as seções passam pelos processos de desbaste e polimento até estarem com a superfície perfeitamente plana e polida, de modo a estarem aptas a serem analisadas no MEV.

Para a caracterização ao MEV, as seções polidas foram inicialmente objeto de mapeamento de raios X (modo de operação *mapping*) pelo sistema de microanálise Esprit. O objetivo foi avaliar qualitativamente a composição da amostra e os principais elementos presentes, de modo que foram selecionados os principais elementos químicos presentes nas amostras: Si, Al, Ca, Mg, Na, K, Fe que possibilita o mapeamento de cada ponto em função de sua composição química.

Posteriormente, a quantificação das fases e as respectivas associações foram determinadas pelo sistema de análise de imagens automatizada MLA - Mineral Liberation Analyser (FEI) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Quanta 600 FEG (FEI), equipado com sistema de microanálise por EDS Esprit-Quantax 4030 (tecnologia SDD, *silicon drift detector*), marca Bruker.

A primeira etapa consistiu na criação de um banco de dados de padrões minerais, conforme procedimento descrito por Fandrich (Fandrich *et al.* 2007). Esse banco de dados deve ser elaborado antes de iniciar uma rotina automatizada de análise, e envolve a coleta de uma série de espectros de raios X de cada espécie mineral na própria seção.

Para o estabelecimento de uma rotina de análise configurou-se as condições de aquisição do microscópio e do MLA de modo que se tornem um padrão a ser seguido ao longo do projeto. Parâmetros como brilho e contraste foram mantidos constantes para todas as amostras, pois influenciam na identificação de fases pelo BSE.

Foi utilizado o sistema de coleta de imagens de elétrons retro espalhados (BSE) com segmentação de partículas e coleta de espectros de raios X por EDS no modo GXMAP. Por padrão (modo XBSE), é realizada apenas uma coleta de espectro de raios X para cada região de uma partícula onde há variação de tom de cinza no BSE, porém foram identificadas perdas de informações em fases de composição químicas distintas e com tons de cinza muito próximos. Nessas áreas de número atômico próximo e composições distintas foi utilizado o modo GXMAP, um recurso avançado de análise do MLA que permite estabelecer um intervalo de cinza para um mapeamento por composição química em uma malha de pontos uniforme e mais densa, de modo a discriminar melhor as fases cujas tonalidades na imagem de BSE são muito semelhantes.

Após a coleta, foi realizada a classificação das partículas. Os espectros de raios X coletados são sistematicamente comparados com aqueles do banco de dados e as partículas são classificadas de acordo com sua equivalência, gerando uma imagem digital da seção onde cada fase é representada por uma cor. Os resultados gerados são analisados com base nas imagens geradas de forma a se

obter informações sobre as proporções de cada fase e suas respectivas formas de associação e liberação.

A confiabilidade nos resultados obtidos pode ser visualmente demonstrada pela distinção de fases com texturas bastante complexas e na habilidade do sistema na diferenciação entre os carbonatos e a pasta cimentícia.

Distinção entre os carbonatos (calcita/dolomita) e a pasta de cimento

Imagem de elétrons retroespalhados

Imagens digitais com identificação das fases

Distinção de fases com textura complexa

Mineral
Titante
Quartz
cement_pa...
Orthoclase
Albite
Calcite
Ca_Si
Muscovite
Biotite
Apatite
Ceramic
CaAl_Fe

APÊNDICE 4 - PRODUÇÃO, BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO

Esquema de operação de britador de impacto vertical, Metso

Britagem terciária em britador de impacto vertical Barmac 3000

Condições operacionais e balanço de massa da britagem terciária

Velocidade do rotor (m/s)	Alimentação (t/h)	Saída (t/h)	Retorno (t/h)
55	4,7	14,8	8,2
65	4,0	10,9	5,7
75	4,6	8,4	3,6

Os balanços de massa da britagem terciária em VSI mostram que a carga circulante (retorno) é maior quanto menor a velocidade do rotor, confirmando que quanto maior a velocidade, maior a taxa de redução.

Usina de testes piloto na Metso

Detalhe do fechamento do circuito com peneira

Fotografias dos testes de britagem terciária em VSI-Barmac 3000

Atrição

Célula de atrição Denver D-12 com duas hélices

Elutriação

Arranjo do elutriador e
rotâmetros

Elutriador Alfredo:
frações $>0,84$ mm

Elutriador Conde:
frações $<0,84$ mm

Equipamentos de elutriação empregados

Separações sequenciais em líquido denso

Amostra classificada

Procedimento de separação sequencial em líquido com densidades crescentes
(BURT, 1984)

1-Imersão das partículas em líquido denso; 2-Agitação; 3-Definição do flutuado e afundado; 4-Retirada do flutuado por cesto; 5-Recuperação do líquido denso por filtragem do flutuado; 6-Recuperação do líquido denso por filtragem do afundado.

Procedimento empregado para separação por líquidos densos em becker (ANGULO, 2005)

(SAMPAIO e TAVARES, 2005b)

frações entre 0,60 e 0,15 mm

Separação em líquido denso em funil tipo Squib

Mesa concentradora Wilfley

Arranjo das partículas de diferentes densidades sobre uma mesa concentradora (SAMPAIO e TAVARES, 2005b)

Espiral concentradora

espiral concentradora Akaflex

perfil de separação em espiral de Humphreys (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982)

Separador magnético Frantz de barreiras

Separador magnético de rolos de terras raras - RE-Roll

Diagrama esquemático da separação em rolos de terras raras (RE-Roll²⁹)

²⁹ Adaptado de www.magneticseparators.in

Principais equipamentos empregados na caracterização dos produtos da rede de infraestrutura do Laboratório de Caracterização Tecnológica (Poli-USP)

Análise de imagens dinâmica - CAMSIZER

Espectrômetro de fluorescência de raios X Axios Advanced, PanAlytical

Difratômetro de raios X Philips MPD 1880

Porosímetro de mercúrio

MEV Quanta 600F, FEI - detalhe da câmara de amostra com ilustração da imagem digital gerada pela análise de imagens automatizada por MLA

Detalhe do microscópio estereoscópico Leica com sistema de aquisição digital de imagens

APÊNDICE 5 - ANÁLISES GRANULOQUÍMICAS (TQ, AREIAS VSI)

Análise granuloquímica da amostra tal qual

Fração (mm)	massa %	Teores (% massa)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	PF	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Pasta
-19+12,7	25,7	64,7	9,52	3,06	9,50	6,15	1,76	2,72	1,69	0,11	0,39	0,11	21,1
-12,7+9,5	11,6	64,4	9,38	3,04	9,67	6,44	1,62	2,64	1,73	0,11	0,37	0,10	22,4
-9,5+6,3	9,4	63,5	9,57	2,99	9,58	6,45	1,74	2,68	1,69	0,12	0,39	0,10	18,2
-6,3+4,8	6,3	64,5	9,43	2,90	9,69	6,51	1,71	2,62	1,58	0,10	0,37	0,10	20,3
-4,8+3,34	6,2	64,6	9,22	3,55	9,33	6,40	1,51	2,55	1,56	0,21	0,37	0,12	20,8
-3,6+2,0	7,2	65,7	8,81	2,87	9,28	6,92	1,31	2,44	1,52	0,11	0,35	<0,10	18,4
-2,0+1,2	6,5	69,2	7,89	2,54	8,38	6,49	1,04	2,14	1,38	0,10	0,33	<0,10	18,1
-1,2+0,60	7,7	73,6	6,65	2,28	7,26	5,58	0,78	1,81	1,22	<0,10	0,27	<0,10	18,0
-0,6+0,3	7,0	75,2	5,77	2,04	7,06	5,53	0,60	1,55	1,14	<0,10	0,27	<0,10	12,0
-0,3+0,15	6,1	73,0	6,09	2,21	8,07	6,61	0,52	1,46	1,28	<0,10	0,36	<0,10	18,9
-0,15+0,074	2,4	62,4	8,28	3,05	11,6	9,62	0,60	1,65	1,81	<0,10	0,55	0,17	26,4
-0,074	3,9	40,2	14,1	4,52	17,8	17,2	0,61	1,67	2,46	0,11	0,81	0,26	50,4
Total calc.	100,0	65,8	8,78	2,90	9,38	6,78	1,34	2,34	1,58	-	0,38	-	25,6

Análise granuloquímica das areias VSI

	Fração (mm)	massa %	Teores (% massa)											
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	PF	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Pasta
VSI-55	-3,0+2,0	15,5	63,2	10,7	2,95	9,38	6,60	2,04	3,20	1,48	<0,10	0,38	0,15	23,0
	-2,0+1,2	14,1	65,8	8,97	2,77	8,94	6,39	1,48	2,80	1,28	0,10	0,34	0,13	24,9
	-1,2+0,60	21,1	72,6	7,39	2,46	7,17	5,45	1,06	2,24	1,04	<0,10	0,28	<0,10	19,9
	-0,6+0,3	15,1	75,0	6,30	2,04	7,11	5,33	0,80	1,92	0,95	<0,10	0,28	<0,10	21,3
	-0,3+0,15	15,6	72,2	6,47	2,45	8,46	6,68	0,66	1,83	1,14	<0,10	0,37	<0,10	24,2
	-0,15+0,074	8,0	62,7	8,22	3,29	11,8	9,18	0,82	2,16	1,65	<0,10	0,56	0,15	33,2
	-0,074	10,6	40,6	12,4	4,38	20,8	15,6	0,83	1,99	2,57	0,11	0,75	0,20	56,8
	Total calc.	100,0	66,3	8,42	2,78	9,76	7,31	1,13	2,32	1,36	-	0,39	-	26,9
VSI-65	-3,0+2,0	12,9	62,2	11,3	2,89	9,68	6,70	2,19	3,20	1,60	<0,10	0,39	0,25	24,4
	-2,0+1,2	14,0	66,9	9,87	2,93	8,52	5,87	1,77	2,92	1,29	0,10	0,34	0,17	25,0
	-1,2+0,60	20,0	72,2	7,70	2,82	7,27	5,02	1,27	2,41	1,05	0,14	0,27	0,10	21,7
	-0,6+0,3	15,0	75,8	6,54	2,17	6,95	5,12	0,93	2,04	0,96	<0,10	0,28	<0,10	20,4
	-0,3+0,15	16,8	74,6	6,40	2,30	7,61	5,80	0,71	1,92	1,03	<0,10	0,35	<0,10	23,0
	-0,15+0,074	8,3	63,0	8,74	3,11	11,6	8,39	0,84	2,33	1,60	<0,10	0,55	0,15	33,8
	-0,074	12,9	41,5	12,1	3,99	20,4	15,9	0,81	2,17	2,41	0,10	0,71	0,20	57,4
	Total calc.	100,0	66,4	8,72	2,83	9,81	7,18	1,22	2,41	1,35	-	0,39	-	28,1
VSI-75	-3,0+2,0	13,3	62,0	11,7	3,37	8,93	6,40	2,27	3,30	1,76	0,13	0,44	0,18	24,8
	-2,0+1,2	13,9	64,3	10,8	3,01	9,13	6,33	2,03	3,09	1,52	<0,10	0,39	0,13	25,8
	-1,2+0,60	20,3	70,7	8,65	2,66	7,68	5,39	1,39	2,55	1,21	0,10	0,30	0,11	24,2
	-0,6+0,3	15,4	75,7	6,65	2,53	6,42	4,46	0,92	2,05	0,96	0,10	0,27	<0,10	21,4
	-0,3+0,15	16,5	74,1	6,44	2,22	7,40	6,22	0,73	1,91	1,07	<0,10	0,35	<0,10	22,9
	-0,15+0,074	8,9	64,9	8,30	3,24	10,6	7,46	0,85	2,35	1,55	<0,10	0,54	0,14	31,0
	-0,074	11,8	43,8	11,9	4,02	19,5	15,0	0,86	2,28	2,45	0,11	0,71	0,20	53,9
	Total calc.	100,0	66,3	9,05	2,92	9,46	6,97	1,30	2,49	1,43	-	0,40	-	28,0

APÊNDICE 6 - SEPARAÇÕES EM LÍQUIDO DENSO E CARACTERIZAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES POR MEV-MLA (VSI-75)

Composição química dos produtos de separação em líquido denso (estudos de separabilidade), amostra VSI-75

Fração (mm)	Massa ensaio	Teores (%)											Distribuição (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	PF	CaO +PF	Pasta	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O	CaO +PF	
-3,0+2,0																	
d<2,2	6,2	52,1	6,67	3,20	1,94	0,49	1,33	18,9	12,9	31,8	44,7	5,3	3,7	4,6	2,1	13,0	
2,2<d<2,5	24,0	62,3	6,71	3,00	1,48	0,65	2,04	12,9	8,83	21,7	29,3	24,8	14,4	17,0	11,9	34,7	
2,5<d<2,6	17,0	64,2	13,2	3,07	0,88	2,31	5,40	5,07	3,65	8,72	11,8	18,1	20,1	12,3	24,1	9,9	
d>2,6	52,8	59,1	13,1	5,31	1,96	3,21	3,17	7,71	4,34	12,0	22,3	51,8	61,8	66,1	61,9	42,4	
Total ensaio	100,0	60,3	11,2	4,24	1,66	2,27	3,16	9,19	5,83	15,0	23,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-2,0+1,2																	
d<2,2	6,7	52,3	6,73	2,58	1,90	0,52	1,33	18,3	12,4	30,7	51,0	5,5	4,5	5,1	2,6	14,2	
2,2<d<2,5	25,0	62,4	6,78	2,59	1,49	0,59	2,23	12,7	8,96	21,7	30,5	24,6	16,9	19,2	14,6	37,6	
2,5<d<2,6	18,7	67,6	12,0	2,46	0,76	1,81	5,05	4,19	3,41	7,60	9,40	19,9	22,3	13,6	26,5	9,8	
d>2,6	49,7	63,8	11,4	4,20	1,54	2,77	2,72	6,31	4,80	11,1	18,1	50,0	56,4	62,0	56,4	38,3	
Total ensaio	100,0	63,4	10,0	3,36	1,40	1,89	2,94	8,32	6,09	14,4	21,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-1,2+0,6																	
d<2,2	4,8	46,4	7,22	2,47	2,03	0,42	1,34	21,6	15,1	36,7	53,4	3,2	4,5	3,4	2,3	14,9	
2,2<d<2,5	22,2	60,9	7,01	2,31	1,46	0,58	2,41	13,3	9,80	23,1	29,2	19,5	20,0	14,4	18,2	43,2	
2,5<d<2,6	19,9	71,4	9,31	3,30	0,57	1,26	4,09	4,00	3,00	7,00	10,7	20,4	23,8	18,5	29,1	11,7	
d>2,6	53,1	74,6	7,60	4,26	0,99	1,72	1,76	4,21	2,56	6,77	11,6	56,9	51,8	63,8	50,5	30,2	
Total ensaio	100,0	69,6	7,79	3,55	1,06	1,31	2,34	7,04	4,86	11,9	17,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-0,6+0,3																	
d<2,2	4,8	40,6	7,70	2,97	2,38	0,36	1,23	25,3	19,3	44,6	62,7	2,7	5,9	4,9	2,7	18,5	
2,2<d<2,5	15,6	55,9	7,26	2,47	1,68	0,53	2,42	15,1	11,7	26,7	36,3	11,8	17,9	13,3	16,0	36,1	
2,5<d<2,6	17,6	70,2	9,73	2,03	0,58	1,04	5,03	4,82	4,31	9,13	14,2	16,7	27,0	12,2	37,1	13,8	
d>2,6	62,0	81,8	5,03	3,27	0,69	1,02	1,03	3,08	2,81	5,89	9,53	68,8	49,3	69,6	44,2	31,5	
Total ensaio	100,0	73,7	6,33	2,91	0,91	0,92	1,96	6,33	5,25	11,6	17,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-0,3+0,15																	
d<2,2	6,7	32,2	8,27	3,24	3,15	0,32	0,95	30,6	20,9	51,5	76,4	3,0	8,9	8,0	3,2	26,6	
2,2<d<2,5	12,2	49,3	8,11	2,77	2,26	0,50	2,17	18,8	15,2	33,9	45,4	8,2	15,8	12,3	12,3	31,7	
2,5<d<2,6	29,2	74,1	7,83	1,82	0,51	0,88	3,67	4,68	4,28	8,96	10,1	29,8	36,8	19,5	50,2	20,1	
d>2,6	51,9	82,5	4,61	3,16	0,76	0,85	0,90	3,12	2,28	5,39	9,15	59,0	38,5	60,2	34,3	21,6	
Total ensaio	100,0	72,6	6,22	2,73	1,03	0,78	1,87	7,32	5,67	13,0	18,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-3,0+0,15																	
d<2,2	5,8	44,2	7,36	2,89	0,42	1,22	2,32	23,3	16,2	39,5	58,5	3,7	5,2	5,0	2,5	17,5	
2,2<d<2,5	19,6	59,2	7,08	2,59	0,58	2,26	1,61	14,1	10,4	24,5	32,7	17,0	17,1	15,3	14,7	36,9	
2,5<d<2,6	20,7	70,4	9,90	2,49	1,34	4,45	0,63	4,51	3,75	8,26	11,0	21,3	25,2	15,4	31,6	13,1	
d>2,6	53,9	73,5	7,93	3,98	1,80	1,81	1,13	4,65	3,21	7,86	13,4	58,0	52,5	64,3	51,2	32,5	
Total ensaio	100	68,4	8,14	3,34	1,39	2,41	1,19	7,55	5,48	13,0	19,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Imagens representativas em microscópio estereoscópico dos produtos das separações em líquidos densos, amostra VSI-75

Produto $d < 2,2$ (-2,0+1,2 mm)

Produto $d < 2,2$ (-1,2+0,60 mm)

O produto $d < 2,2$ caracteriza-se pela elevada quantidade de partículas porosas, com alto teor de pasta de cimento e baixa quantidade de cerâmicas e fragmentos de rochas.

Produto $2,2 < d < 2,5$ (-2,0+1,2 mm)

Produto $2,2 < d < 2,5$ (-1,2+0,60 mm)

O produto situado entre as densidades 2,2 e 2,5 g/cm³ constitui-se por partículas com elevada proporção de pasta de cimento aderida, além de feldspatos. As análises por DRX indicam a presença de feldspatos como albita e microclínio.

Produto 2,5<d<2,6 (-2,0+1,2 mm)

Produto 2,5<d<2,6 (-1,2+0,60 mm)

O produto 2,5<d<2,6 se caracteriza pela alta quantidade de cerâmica e partículas com menor teor de pasta de cimento. Nesse produto já se observam partículas de quartzo com pequena quantidade de pasta de cimento aderida; a presença de feldspatos é maior, em conformidade com os resultados de DRX.

Produto 2,6<d<2,64 (-2,0+1,2 mm)

Produto 2,6<d<2,64 (-1,2+0,60 mm)

O produto 2,6<d<2,64 apresenta maior quantidade de cerâmica e fragmentos de rochas e menor quantidade de partículas porosas. São observadas partículas de quartzo liberadas e fragmentos de rocha, como indicado pela presença de albita e microclínio por DRX.

Produto $d > 2,64$ (-2,0+1,2 mm)

Produto $d > 2,64$ (-1,2+0,60 mm)

O produto $d > 2,64$ apresenta maior quantidade de minerais micáceos (biotita, segundo os resultados de DRX) e grãos de quartzo liberados, e menor quantidade de cerâmica e partículas porosas. São constituídos principalmente por fragmentos de rocha britados oriundos da britagem dos agregados presentes no concreto original. As análises por FRX (CaO + PF), DRX e MEV indicaram presença de dolomita nessa densidade.

Composição dos produtos da separação em líquido denso (% massa)

Produtos da separação	Fases (% massa)					Total
	<2,2	2,2-2,5	2,5-2,6	2,6-2,64	>2,64	
-3,0+2,0mm	6,2	24	17	12	41	100
quartzo	57	52	27	43	23	35
feldspatos	5,7	21	43	42	44	36
pasta cimento	30	16	8,1	1,9	1,2	7,8
carbonatos	2,7	4,8	4,3	3,1	7,8	5,6
ceramica	3,9	4,3	14	1,0	2,1	4,7
micas	1,2	0,8	2,0	6,1	11	6,0
pirox_anfib	0,0	0,0	0,3	1,7	8,8	3,9
outros	0,3	0,4	0,4	0,9	2,0	1,1
-2,0+1,2mm	6,7	25	19	21	29	100
quartzo	46	57	39	62	32	47
feldspatos	6,1	17	43	31	34	29
pasta de cimento	39	18	4,5	1,6	1,7	8,7
carbonatos	3,3	2,9	1,0	0,2	11	4,3
cerâmica	3,6	4,1	9,7	2,3	2,0	4,1
micas	1,1	1,0	1,1	2,3	12	4,5
pirox_anfib	0,0	0,0	1,1	1,1	5,2	1,9
outros	0,4	0,3	0,4	0,3	2,7	1,0
-1,2+0,60mm	4,8	22	20	28	25	100
quartzo	36	47	54	79	43	56
feldspatos	5,5	19	35	17	25	22
pasta de cimento	51	22	4,7	1,2	1,4	9,1
carbonatos	2,5	2,5	0,8	0,3	8,7	3,1
cerâmica	3,6	6,7	4,1	0,8	2,8	3,4
micas	0,8	1,2	0,6	0,7	9,6	3,0
pirox_anfib	0,0	0,0	0,0	0,6	6,6	1,8
outros	0,5	1,0	0,2	0,1	2,5	0,9
-0,60+0,30mm	4,8	16	18	45	17	100
quartzo	16	48	49	88	45	64
feldspatos	5,6	17	37	7,6	17	16
pasta cimento	71	27	7,7	1,8	1,8	10
carbonatos	1,8	2,3	1,0	0,2	9,7	2,4
ceramica	3,3	3,4	3,8	1,3	2,8	2,4
micas	0,8	1,6	0,6	0,3	10	2,3
pirox_anfib	0,4	0,8	0,7	0,5	9,2	2,0
outros	0,5	0,6	0,2	0,1	4,3	0,9
-0,30+0,15mm	6,7	12	29	34	18	100
quartzo	9,4	25	59	87	51	60
feldspatos	3,9	14	26	8,0	11	14
pasta cimento	81	49	9,6	2,2	2,1	15
carbonatos	2,3	3,6	1,1	0,5	8,1	2,5
ceramica	2,7	5,7	3,2	1,0	3,3	2,7
micas	0,7	1,7	0,7	0,4	9,4	2,3
pirox_anfib	0,0	0,0	0,0	0,9	7,7	1,7
outros	0,3	0,5	0,1	0,1	6,8	1,4

Associações do quartzo+feldspato em partículas mistas (-3,0+2,0 mm)

Fases minerais	Produtos					Total na fração
	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	
Livre	3,87	16,3	51,8	30,8	20,0	25,1
Mista em binária	82,3	69,1	36,7	46,5	40,1	50,0
micas		3,70	14,5	36,9	24,7	18,2
carbonatos				0,01	0,88	0,34
pasta de cimento	80,4	61,2	18,8	2,88		23,2
cerâmica	1,89	4,23	0,59		3,03	2,42
pirox_anfib			2,73	6,67	9,80	5,18
outros				0,03	1,64	0,63
Mista em ternária	13,8	14,5	11,5	22,7	40,0	24,9
micas	0,25	1,11	3,04	12,5	19,7	10,2
carbonatos	1,85	3,30	1,14	0,13	0,43	1,30
pasta de cimento	9,81	8,52	5,14	2,78	0,77	4,22
cerâmica	1,88	1,10	0,85	0,98	3,05	1,83
pirox_anfib				5,03	12,0	5,31
outros		0,49	1,33	1,26	4,10	2,10

Associações do quartzo+feldspato em partículas mistas (-2,0+1,2 mm)

Fases minerais	Produtos					Total na fração
	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	
Livre	0,81	19,8	54,9	72,4	25,0	40,6
Mista em binária	80,9	66,1	35,3	22,5	45,3	44,3
micas		0,80	4,57	9,77	37,0	12,9
carbonatos				0,34	3,10	0,87
pasta de cimento	80,0	64,2	23,0	5,70	0,52	25,8
cerâmica	0,89	1,04	3,00	0,94		1,15
pirox_anfib			4,66	3,01	2,43	2,32
Anatasio						
outros				2,75	2,27	1,26
Mista em ternária	18,3	14,2	9,89	5,11	29,7	15,1
micas	1,41	0,81	1,53	2,53	13,5	4,62
carbonatos	2,12	1,81	0,45		1,44	1,00
pasta de cimento	12,9	8,96	4,94	0,88	1,12	4,31
cerâmica	1,90	2,35	1,10	0,29	0,74	1,15
pirox_anfib			1,34	1,40	7,86	2,61
Anatasio						
outros		0,23	0,52	0,01	4,98	1,42

Associações do quartzo+feldspato em partículas mistas (-1,2+0,6 mm)

Fases minerais	Produtos					Total na fração
	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	
Livre	3,48	11,5	66,7	83,2	60,0	59,0
Mista em binária	84,6	75,2	26,7	14,6	23,7	32,4
micas	0,04	0,31	0,08	3,54	16,3	4,83
carbonatos	0,10	0,57	0,44	0,47	0,58	0,50
pasta de cimento	84,2	73,4	23,4	7,30	1,24	23,9
cerâmica	0,25	0,88	1,75	1,63	0,71	1,28
pirox_anfib				1,44	3,02	1,15
outros			1,04	0,25	1,84	0,72
Mista em ternária	0,55	1,21	0,61	0,60	6,69	2,04
micas	1,24	1,53	0,72	0,09	1,07	0,75
carbonatos	9,06	8,53	3,85	0,76	1,26	3,23
pasta de cimento	0,97	1,71	1,47	0,14	1,29	1,01
cerâmica				0,49	4,02	1,04
pirox_anfib	0,13	0,28	0,03	0,06	2,02	0,52
outros	3,48	11,5	66,7	83,2	60,0	59,0

Associações do quartzo+feldspato em partículas mistas (-0,6+0,3 mm)

Fases minerais	Produtos					Total na fração
	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	
Livre	0,98	17,5	44,7	81,5	66,7	63,4
Mista em binária	86,6	71,4	50,2	17,0	21,3	31,7
micas		0,70	0,40	1,19	11,0	2,25
carbonatos		0,42	0,34	0,08	0,71	0,25
pasta de cimento	86,2	69,0	46,7	12,4	1,96	25,7
cerâmica	0,19	0,71	1,85	1,79	1,59	1,62
pirox_anfib	0,24	0,20	0,57	1,29	3,48	1,29
outros		0,40	0,35	0,28	2,57	0,60
Mista em ternária	12,4	11,1	5,07	1,48	12,0	4,91
micas	0,52	0,83	0,42	0,29	3,79	0,85
carbonatos	0,62	1,05	0,60	0,06	1,07	0,43
pasta de cimento	9,49	7,28	2,92	0,50	0,87	1,98
cerâmica	1,43	1,20	0,66	0,17	0,89	0,50
pirox_anfib	0,13	0,28	0,26	0,42	4,25	0,87
outros	0,22	0,47	0,22	0,04	1,15	0,27

Associações do quartzo+feldspato em partículas mistas (-0,3+0,15 mm)

Fases minerais	Produtos					Total na fração
	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	
Livre	3,14	4,39	41,1	79,0	72,8	59,7
Mista em binária	84,0	82,2	53,6	18,7	18,8	35,3
micas	0,24	0,08	0,49	0,71	5,60	1,34
carbonatos	0,13	0,04	0,70	0,30	1,75	0,64
pasta de cimento	83,4	80,8	49,7	12,7	3,90	28,9
cerâmica	0,22	1,23	2,45	1,84	1,32	1,91
pirox_anfib				2,93	4,09	1,90
outros		0,01	0,19	0,28	2,17	0,52
Mista em ternária	0,39	0,47	0,38	0,24	2,45	0,64
micas	0,67	1,19	0,65	0,10	0,73	0,46
carbonatos	10,1	9,73	2,81	0,94	0,96	2,25
pasta de cimento	1,52	1,96	1,45	0,42	0,87	0,95
cerâmica			0,03	0,55	2,53	0,64
pirox_anfib	0,16	0,12	0,04	0,03	0,80	0,16
outros	3,14	4,39	41,1	79,0	72,8	59,7

APÊNDICE 7- COMPOSIÇÃO DOS PRODUTOS DA ELUTRIAÇÃO (VSI 65-75)

Resultados da separação por elutriação - amostra composta VSI 65-75

Produtos	Massa	ME	d>2,6	Teores (%)										Distribuição (%)		
	(%)	(g/cm³)	(%)	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	Na₂O	K₂O	MgO	CaO	PF	pasta	SiO₂	Na₂O+K₂O	CaO+PF	
-2,0+1,2																
Leve	25%	2,48	26%	62,3	9,18	2,54	1,11	2,46	1,49	11,4	8,32	32,8	22,9	18,9	35,3	
Pesado	75%	2,62	57%	68,3	9,88	2,67	2,02	2,99	1,21	6,99	4,83	20,8	77,1	81,1	64,7	
Total	100%	2,59	50%	66,8	9,71	2,64	1,80	2,86	1,28	8,08	5,69	23,8	100	100	100	
-1,2+1,0																
Leve	17%	2,46	20%	61,3	8,95	2,51	0,87	2,35	1,55	12,3	8,68	34,3	15,4	13,1	27,1	
Pesado	83%	2,61	62%	70,1	9,04	2,39	1,74	2,74	1,08	6,64	5,13	21,9	84,6	86,9	72,9	
Total	100%	2,59	55%	68,6	9,03	2,41	1,59	2,67	1,16	7,62	5,74	24,0	100	100	100	
-1,0+0,84																
Leve	23%	2,47	28%	61,6	8,81	2,76	0,80	2,32	1,54	11,9	8,70	34,3	19,8	18,8	37,4	
Pesado	77%	2,62	64%	73,5	8,00	2,29	1,49	2,49	0,93	5,86	4,27	19,2	80,2	81,2	62,6	
Total	100%	2,58	56%	70,8	8,18	2,39	1,34	2,45	1,07	7,22	5,28	22,7	100	100	100	
-0,84+0,60																
Leve	20%	2,53	26%	61,4	8,63	3,42	0,76	2,26	1,54	11,8	9,01	34,7	16,9	17,8	35,0	
Pesado	80%	2,59	55%	75,9	7,17	1,88	1,27	2,23	0,81	5,46	4,23	20,0	83,1	82,2	65,0	
Total	100%	2,58	49%	73,0	7,46	2,19	1,17	2,24	0,96	6,73	5,19	23,0	100	100	100	
-0,60+0,42																
Leve	18%	2,35	26%	60,4	9,07	3,09	0,68	2,29	1,74	13,4	8,12	39,1	14,3	17,9	37,4	
Pesado	82%	2,61	63%	78,8	5,97	2,42	1,02	1,95	0,69	4,71	3,16	15,7	85,7	82,1	62,6	
Total	100%	2,56	56%	75,5	6,52	2,54	0,96	2,01	0,88	6,27	4,05	19,9	100	100	100	
-0,42+0,30																
Leve	18%	2,36	26%	58,4	9,07	3,05	0,66	2,23	1,95	14,6	8,59	41,8	13,4	18,2	38,7	
Pesado	82%	2,60	53%	79,8	5,62	2,27	0,90	1,86	0,68	4,73	3,07	15,6	86,6	81,8	61,3	
Total	100%	2,55	49%	76,0	6,23	2,41	0,86	1,92	0,90	6,46	4,04	20,2	100	100	100	
-0,30+0,21																
Leve	21%	2,38	19%	64,5	8,11	2,65	0,71	2,07	1,53	11,6	7,49	35,2	18,4	22,2	34,5	
Pesado	79%	2,59	51%	77,1	5,95	2,56	0,80	1,83	0,81	5,93	3,85	19,2	81,6	77,8	65,5	
Total	100%	2,55	44%	74,5	6,41	2,58	0,78	1,88	0,96	7,13	4,62	22,6	100	100	100	
-0,21+0,15																
Leve	19%	2,39	29%	51,6	9,65	3,48	0,62	2,13	2,39	17,7	11,5	50,4	13,7	20,4	42,3	
Pesado	81%	2,59	56%	77,4	5,64	2,95	0,80	1,76	0,79	5,50	3,95	19,0	86,3	79,6	57,7	
Total	100%	2,55	51%	72,4	6,41	3,05	0,76	1,83	1,10	7,84	5,41	25,0	100	100	100	
Total -2,0+0,15																
Leve	20%	2,43	25%	60,4	8,92	2,96	0,78	2,27	1,70	12,9	8,71	37,6	17,1	18,7	36,2	
Pesado	80%	2,60	57%	75,3	7,11	2,41	1,25	2,22	0,87	5,68	4,00	18,8	82,9	81,3	63,8	
Total	100%	2,57	51%	72,4	7,45	2,51	1,15	2,22	1,03	7,11	4,94	22,5	100	100	100	

APÊNDICE 8 - COMPOSIÇÃO DOS PRODUTOS DA MESA CONCENTRADORA (VSI 65-75)

Resultados da concentração em mesa oscilatória por fração granulométrica - amostra composta VSI 65-75

Fração/ Produto	Massa (%)	ME (g/cm³)	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	Na ₂ O +K ₂ O	CaO +PF
-2,0+1,7 mm															
pesado	72,1	2,63	64,5	11,3	2,69	2,39	3,33	1,41	7,59	5,68	72,8	75,7	75,0	78,6	65,9
leve	27,9	2,39	62,4	9,39	2,33	1,41	2,64	1,39	10,5	7,27	27,2	24,3	25,0	21,4	34,1
Total	100,0	2,56	63,9	10,8	2,59	2,12	3,13	1,40	8,39	6,13	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-1,7+1,2 mm															
pesado	64,8	2,58	67,2	9,98	2,76	2,05	2,98	1,31	6,90	5,92	66,0	67,4	67,8	71,8	55,2
leve	35,2	2,39	63,7	8,89	2,41	1,15	2,47	1,39	10,8	8,30	34,0	32,6	32,2	28,2	44,8
Total	100,0	2,52	66,0	9,60	2,63	1,73	2,80	1,34	8,27	6,76	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-1,2+0,84															
pesado	72,5	2,64	73,0	8,13	2,27	1,50	2,54	1,01	5,90	4,34	74,6	71,9	73,7	76,6	59,8
leve	27,5	2,47	65,7	8,37	2,14	0,98	2,28	1,29	10,4	7,74	25,4	28,1	26,3	23,4	40,2
Total	100,0	2,59	71,0	8,20	2,24	1,35	2,47	1,09	7,13	5,27	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-0,84+0,60 mm															
pesado	67,0	2,63	67,0	2,63	76,2	7,11	1,99	1,31	2,27	0,84	5,21	3,90	69,2	64,9	67,1
leve	33,0	2,42	33,0	2,42	68,8	7,80	1,98	1,10	2,28	1,14	9,03	6,59	30,8	35,1	32,9
Total	100,0	2,56	100,0	2,56	73,8	7,34	1,99	1,24	2,28	0,94	6,47	4,79	100,0	100,0	100,0
-0,60+0,42 mm															
pesado	73,2	2,62	73,2	2,62	78,4	6,21	1,98	1,13	2,00	0,74	4,63	3,92	76,5	68,4	72,5
leve	26,8	2,42	26,8	2,42	65,9	7,85	2,06	0,83	2,20	1,27	10,7	7,83	23,5	31,6	27,5
Total	100,0	2,57	100,0	2,57	75,1	6,65	2,00	1,05	2,06	0,88	6,25	4,97	100,0	100,0	100,0
-0,42+0,30 mm															
pesado	81,7	2,61	81,7	2,61	78,8	5,68	2,15	0,87	1,85	0,68	4,71	4,24	85,7	75,5	79,0
leve	18,3	2,32	18,3	2,32	58,7	8,25	2,55	0,73	2,08	1,68	13,7	11,1	14,3	24,5	21,0
Total	100,0	2,56	100,0	2,56	75,1	6,15	2,22	0,85	1,89	0,87	6,36	5,50	100,0	100,0	100,0
-0,30+0,21 mm															
pesado	69,8	2,62	69,8	2,62	79,5	5,38	1,96	0,79	1,74	0,70	4,94	3,97	74,6	61,0	67,1
leve	30,2	2,43	30,2	2,43	62,3	7,92	2,22	0,70	2,13	1,47	12,8	9,46	25,4	39,0	32,9
Total	100,0	2,56	100,0	2,56	74,3	6,15	2,04	0,76	1,86	0,94	7,33	5,63	100,0	100,0	100,0
-0,21+0,15 mm															
pesado	78,8	2,63	78,8	2,63	77,0	5,65	2,34	0,85	1,75	0,82	5,64	4,57	83,7	70,6	75,3
leve	21,2	2,44	21,2	2,44	56,0	8,77	2,86	0,68	2,22	1,96	15,2	10,8	16,3	29,4	24,7
Total	100,0	2,59	100,0	2,59	72,5	6,31	2,45	0,81	1,85	1,06	7,66	5,90	100,0	100,0	100,0
Total -2.0+0.15 mm															
pesado	72,6	2,62	74,6	7,38	2,23	1,35	2,30	0,92	5,63	4,49	75,8	70,1	72,1	74,9	57,3
leve	27,4	2,41	63,2	8,37	2,29	0,96	2,29	1,43	11,5	8,51	24,2	29,9	27,9	25,1	42,7
Total	100,0	2,56	71,5	7,65	2,25	1,25	2,29	1,06	7,24	5,59	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

APÊNDICE 9 - COMPOSIÇÃO DOS PRODUTOS DAS SEPARAÇÕES MAGNÉTICAS (VSI 65-75)

Resultados da separação magnética em Frantz de barreiras - amostra composta VSI 65-75

Produto/ Fração	Massa (%)	Teores (%)								Distribuição ensaio (%)				
		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	Na ₂ O +K ₂ O	CaO + PF
-3,0+2,0 mm														
Mag 0,05	20%	61,8	14,7	5,32	3,49	4,06	1,50	5,01	2,03	20,6	28,2	34,5	30,8	8,2
Mag 0,25	18%	61,8	10,7	3,10	2,05	2,89	1,43	10,9	5,13	18,3	18,2	17,9	17,9	16,7
Mag 0,6	23%	58,8	10,9	3,62	1,57	2,82	1,73	11,6	6,69	22,0	23,4	26,3	20,1	24,0
Não-Mag	39%	60,3	8,10	1,69	1,28	2,64	1,63	12,8	9,63	39,1	30,2	21,3	31,2	51,0
Total calc.	100%	60,5	10,5	3,11	1,93	3,01	1,59	10,6	6,62	100	100	100	100	100
-2,0+1,2 mm														
Mag 0,05	13%	61,0	14,0	6,49	3,20	3,62	1,58	5,83	2,17	12,3	18,6	22,6	18,9	6,9
Mag 0,25	17%	60,6	10,7	4,96	2,09	2,79	1,32	9,60	5,58	16,4	19,1	23,2	18,1	17,6
Mag 0,6	23%	58,4	11,0	5,45	1,54	2,74	1,57	10,0	7,16	20,8	25,7	33,4	20,8	26,2
Não-Mag	47%	68,4	7,50	1,64	1,45	2,73	1,07	8,73	6,79	50,5	36,6	20,8	42,2	49,2
Total calc.	100%	63,8	9,67	3,70	1,81	2,86	1,29	8,80	6,07	100	100	100	100	100
-1,2+0,6 mm														
Mag 0,05	8%	58,4	12,3	7,86	2,64	3,22	1,68	7,39	3,92	6,8	13,0	18,3	13,3	7,6
Mag 0,25	14%	59,1	9,26	5,04	1,27	2,35	1,76	12,1	6,25	11,6	16,4	19,7	13,8	20,7
Mag 0,6	18%	60,9	11,4	4,11	1,41	2,73	1,48	9,98	6,20	16,0	27,0	21,4	21,1	24,4
Não-Mag	60%	77,3	5,66	2,40	1,01	2,13	0,59	5,66	4,02	65,6	43,5	40,6	51,8	47,3
Total calc.	100%	70,2	7,76	3,52	1,25	2,36	1,00	7,48	4,72	100	100	100	100	100
-0,6+0,3 mm														
Mag 0,05	3%	54,8	10,5	10,5	1,84	2,59	2,11	10,2	4,69	2,6	5,8	10,9	5,4	4,4
Mag 0,25	10%	55,8	9,50	7,39	0,91	2,46	2,38	13,3	6,49	7,9	15,5	22,8	12,2	17,3
Mag 0,6	14%	57,4	11,1	5,36	1,13	2,36	1,71	12,2	6,74	11,0	24,6	22,4	17,2	22,4
Não-Mag	72%	79,6	4,72	2,03	0,80	1,76	0,49	5,32	3,83	78,6	54,1	43,9	65,1	56,0
Total calc.	100%	73,2	6,31	3,34	0,89	1,94	0,91	7,27	4,54	100	100	100	100	100
-0,3+0,15 mm														
Mag 0,05	3%	46,4	7,86	16,7	1,00	1,63	2,09	13,4	7,47	1,7	3,2	14,8	2,6	4,1
Mag 0,25	10%	47,9	10,7	8,94	0,65	2,66	3,33	14,4	8,39	6,4	16,0	29,7	12,0	16,7
Mag 0,6	13%	50,3	11,3	4,12	0,83	2,02	2,14	16,9	10,4	9,2	23,2	18,7	14,1	27,2
Não-Mag	75%	80,1	4,96	1,44	0,76	1,78	0,45	5,30	3,91	82,8	57,6	36,9	71,3	52,1
Total calc.	100%	72,2	6,41	2,91	0,77	1,89	0,99	7,91	5,28	100	100	100	100	100
Total -3,0+0,15 mm														
Mag 0,05	9,0	59,4	13,3	7,28	2,94	3,50	1,64	6,66	3,03	7,8	14,8	19,6	20,4	13,2
Mag 0,25	13,6	57,9	10,1	5,52	1,48	2,63	1,91	11,8	6,20	11,5	17,2	22,5	15,5	15,0
Mag 0,6	17,9	57,8	11,1	4,49	1,34	2,59	1,69	11,7	7,23	15,1	24,9	24,2	18,6	19,5
Não-Mag	59,6	75,4	5,78	1,88	0,99	2,09	0,71	6,7	5,0	65,7	43,1	33,7	45,5	52,4
Total calc.	100	68,5	8,00	3,32	1,29	2,38	1,13	8,29	5,36	100	100	100	100	100

Resultados da separação magnética em separador de rolos de terras raras RE-roll - amostra composta VSI 65-75

Produtos RE-Roll	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição (%)				
		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	
-1,2+0,60 mm																
Mag-1	28,5	60,1	11,2	4,57	1,87	2,81	1,80	10,3	5,94	16,2	24,0	40,0	55,3	35,1	37,5	
Mag-2	3,27	60,9	11,3	3,84	1,40	2,69	1,64	10,7	6,07	16,8	2,8	4,6	5,3	3,5	4,4	
Misto-2	9,49	63,2	10,2	2,37	1,45	2,74	1,26	10,4	7,34	17,8	8,4	12,1	9,5	10,4	13,6	
NMag-2	5,41	66,3	9,00	2,29	1,62	2,75	0,99	9,13	7,04	16,2	5,0	6,1	5,3	6,2	7,1	
NMag-1	53,3	79,9	5,58	1,09	1,04	2,16	0,52	4,75	3,92	8,67	59,7	37,2	24,6	44,8	37,4	
Total calc.	100,0	71,3	8,01	2,36	1,36	2,45	1,02	7,31	5,06	12,4	100	100	100	100	100	
-0,60+0,15 mm																
Mag-1	20,7	50,4	10,6	6,71	1,11	2,39	2,54	13,6	8,45	22,0	14,4	32,5	59,0	25,1	37,1	
Mag-2	2,7	50,8	10,7	3,91	0,84	1,92	2,01	15,5	9,88	25,4	1,9	4,3	4,4	2,6	5,5	
Misto-2	3,5	58,0	8,92	2,38	1,02	2,16	1,48	13,2	9,05	22,2	2,8	4,6	3,5	3,8	6,3	
NMag-2	3,8	61,1	9,17	2,98	1,19	2,40	1,50	10,9	7,72	18,6	3,2	5,2	4,8	4,7	5,8	
NMag-1	69,4	81,0	5,17	0,96	0,85	1,80	0,45	4,68	3,36	8,03	77,7	53,4	28,3	63,8	45,4	
Total calc.	100,0	72,3	6,72	2,35	0,92	1,96	1,00	7,33	4,95	12,3	100	100	100	100	100	
Produto composto -1,2+0,15 mm																
Mag-1	27,4	55,0	10,7	5,48	1,31	2,53	2,07	13,0	8,06	21,1	20,8	41,6	61,6	33,3	45,4	
Mag-2	3,3	55,8	10,5	3,76	1,05	2,22	1,73	14,8	9,07	23,8	2,5	4,9	5,0	3,4	6,1	
Misto-2	5,4	64,9	8,49	2,29	1,09	2,37	1,14	11,2	7,76	19,0	4,8	6,6	5,1	5,9	8,1	
NMag-2	4,6	71,5	7,44	1,69	1,31	2,30	0,78	8,18	5,95	14,1	4,6	4,9	3,2	5,3	5,1	
NMag-1	59,3	82,3	4,96	1,03	0,87	1,89	0,37	4,23	3,34	7,57	67,3	42,0	25,1	52,0	35,3	
Total calc.	100,0	72,5	7,01	2,44	1,03	2,12	0,94	7,55	5,18	12,7	100	100	100	100	100	

**Resultados da separação magnética em separador de rolos de terras raras RE-roll -
produto britado (PB -1,2+0,15 mm) da amostra composta VSI 65-75**

Produtos RE-Roll	Massa (%)	Teores (%)										Distribuição (%)				
		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	
100 rpm																
Mag-1	26,7	56,2	11,8	5,43	1,74	2,80	2,13	11,5	6,76	18,3	21,4	36,9	64,2	31,3	36,7	
Mag-2	3,7	56,6	11,6	3,71	1,41	2,40	1,82	12,7	8,93	21,6	3,0	5,0	6,1	3,6	6,0	
Misto-2	16,3	65,5	9,40	1,80	1,41	2,51	1,18	10,3	7,62	17,9	15,2	18,0	13,0	16,4	21,9	
NMag-2	5,7	71,6	8,11	1,38	1,60	2,48	0,78	7,30	6,07	13,4	5,9	5,5	3,5	6,0	5,7	
NMag-1	47,6	80,1	6,17	0,63	1,29	2,19	0,60	4,60	3,72	8,32	54,5	34,6	13,3	42,7	29,7	
Total calc.	100,0	70,0	8,50	2,26	1,45	2,43	1,16	7,84	5,49	13,3	100	100	100	100	100	
110 rpm																
Mag-1	25,7	55,3	11,4	5,63	1,57	2,71	2,15	11,9	7,64	19,5	20,4	35,1	60,6	29,5	36,5	
Mag-2	9,7	55,7	11,4	3,94	1,31	2,32	1,85	13,2	9,19	22,4	7,8	13,3	16,1	9,5	15,9	
Misto-2	3,5	62,2	10,1	2,12	1,41	2,49	1,39	11,6	8,54	20,1	3,1	4,2	3,1	3,6	5,1	
NMag-2	5,5	69,6	8,86	1,49	1,59	2,52	0,96	8,59	6,93	15,5	5,5	5,8	3,4	6,0	6,2	
NMag-1	55,7	79,1	6,23	0,72	1,23	2,22	0,55	4,90	4,04	8,94	63,3	41,6	16,8	51,4	36,3	
Total calc.	100,0	69,6	8,34	2,39	1,35	2,38	1,14	7,92	5,78	13,7	100	100	100	100	100	
115 rpm																
Mag-1	24,6	54,8	11,5	5,80	1,58	2,71	2,25	12,2	7,73	20,0	19,0	34,3	62,0	28,3	36,3	
Mag-2	3,2	57,1	11,5	3,75	1,33	2,37	1,87	13,0	8,96	22,0	2,5	4,4	5,2	3,1	5,1	
Misto-2	8,1	61,1	10,5	2,26	1,38	2,49	1,50	12,1	8,56	20,7	7,0	10,2	7,9	8,4	12,3	
NMag-2	5,4	68,0	9,04	1,71	1,51	2,49	1,04	9,05	6,78	15,8	5,2	5,9	4,0	5,8	6,4	
NMag-1	58,8	80,0	6,35	0,82	1,24	2,20	0,56	4,98	4,18	9,16	66,3	45,1	20,9	54,4	39,9	
Total calc.	100,0	70,9	8,27	2,30	1,35	2,37	1,12	7,81	5,70	13,5	100	100	100	100	100	

APÊNDICE 10 - DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS

Um estudo exploratório do desempenho reológico do agregado miúdo reciclado na formulação de argamassas foi conduzido no produto composto VSI 65-75 britado em britador de rolos abaixo de 1,2 mm e beneficiado segundo os procedimentos anteriormente descritos de atrição, concentração densitária em mesa oscilatória e separação magnética em rolo de terras raras. Os resultados foram comparados aos da areia de RCD gerada na britagem secundária (RCD-areia).

Um fluxograma esquemático da preparação das amostras para os estudos exploratórios de reologia e a identificação dos produtos estudados (em cor verde) é apresentado na Figura A-10. 1.

Figura A-10. 1 - Fluxograma esquemático da preparação das amostras para estudos exploratórios de desempenho reológico dos agregados miúdos reciclados

O desempenho das areias recicladas pelos diferentes processos de beneficiamento foi comparado aos de areias de referência comerciais. Tendo em vista o caráter exploratório deste estudo, as atividades focaram em um primeiro instante a determinação do consumo de água para obtenção de argamassas com

comportamento reológico similar. O objetivo foi avaliar a influência do processamento (britagem por VSI, atrição, concentração densitária e separação magnética) no comportamento do estado fresco (consumo de água, comportamento de mistura e reológico) de argamassas formuladas com os produtos obtidos dos respectivos processos de beneficiamento.

O estudo foi conduzido no Laboratório de Microestrutura de Materiais, do Departamento de Engenharia de Construção Civil da POLI-USP segundo o procedimento experimental abaixo sumarizado:

Composição das areias de referência: foram consideradas duas areias de referência, sendo uma areia fluvial (areia padrão IPT, denominada Ref natural) e uma areia artificial produzida pela britagem de rochas (utilizada em argamassas industrializadas, denominada Ref-artificial). Estas foram compostas para que tivessem distribuições granulométricas semelhantes à da areia reciclada, tendo em vista a influência desta propriedade no empacotamento das partículas e, portanto, no desempenho reológico da mistura.

Caracterização das areias de referência: a análise granulométrica das areias foi realizada por difração de laser de baixo ângulo em equipamento Malvern Mastersizer 2000. A porosidade dos agregados miúdos reciclados foi avaliada por porosimetria com intrusão de mercúrio em equipamento AutoPore IV 9500, da Micromeritics.

Preparação da mistura: as misturas foram compostas segundo uma proporção em volume de 75% de areia (-1,2+0,15 mm) e 25% de finos (<0,15 mm), sendo 12,5% de cimento CPIIF e 12,5% de filler calcário, ambos provenientes de Itaú de Minas (MG). A proporção em massa dos ingredientes foi recalculada considerando as respectivas densidades determinadas por picnometria com intrusão de gás hélio.

Reologia da mistura: o desempenho reológico da mistura foi avaliado por reometria rotacional em reômetro projetado por pesquisadores do Departamento de Engenharia de Construção Civil da POLI-USP para caracterização de argamassas e concretos (Figura A-10. 2). O procedimento envolveu a mistura de 4 kg de material no reômetro com rotação constante de 126 rpm, tendo sido realizado em duas etapas:

a) inicialmente foram consideradas misturas para formulação de argamassas com o mesmo teor de água

b) em um segundo momento, os teores de água das misturas foram ajustados para que as argamassas apresentassem condições de trabalhabilidade semelhantes (definida pelo nível de torque ao final da mistura).

Figura A-10. 2 - Esquema de reômetro do Departamento de Engenharia de Construção Civil da POLI-USP

Os reômetros rotacionais são equipamentos dedicados à avaliação de propriedades reológicas de fluidos e suspensões (incluindo argamassas e concretos) em diversas taxas de fluxo através da aplicação de cisalhamento gerado por movimentos cíclicos rotacionais. Determinam parâmetros como viscosidade e tensão de escoamento através da aplicação de cisalhamento e avaliação do torque necessário para tal ^{30,31}.

O equipamento utilizado mede o torque de fluidos em movimento circular planetário, sendo que a medida realizada no próprio elemento cisalhante, enquanto o recipiente que contem o material (capacidade de 5 a 25 litros) permanece estático.

³⁰ OLIVEIRA, I. R. et al. *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico*. Fazendo Arte Editorial, 2000

³¹ PILEGGI, R. G. *Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários*. 2001. 187 p. Tese (Doutorado) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

Todas as operações de controle, coleta e armazenamento de dados são realizadas através de software de controle. Além disso, permite o preparo das argamassas, eliminando assim a necessidade de prévia mistura e, principalmente, sendo capaz de medir o comportamento de mistura destes materiais ³².

A caracterização das argamassas no estado endurecido foi realizada em corpos-de-prova cilíndricos (diâmetro de 50 mm e altura de 60 mm) considerando medidas de resistência mecânica e do módulo de elasticidade. A cura dos cp's foi realizada em condições controladas (90% umidade relativa e 23°C) por sete e vinte e oito dias, permanecendo em câmara seca por mais sete dias e em estufa (50°C) por mais dois dias para garantir totalmente a secagem.

O módulo de elasticidade foi determinado pelo método do ultra-som (equipamento Pundit, Figura A-10. 3a), conforme descrito por Monte e colaboradores³³. A resistência mecânica à tração foi avaliada por compressão diametral (norma ASTM 496C / 496M-04) em prensa INSTRON (modelo 5569, Figura A-10. 3b) com célula de carga de 50 kN e controle por carga (taxa de carregamento utilizada 0,833 MPa/min). Adicionalmente foram determinadas as densidades e porosidades aparentes pelo princípio de Archimedes (volume deslocado).

³² CARDOSO, F. A. *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*. 2009. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo

³³ MONTE, R. et al. *Módulo de elasticidade dinâmico: comparação entre a velocidade da onda ultrassônica e frequência ressonante*. In: VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas 2007. Recife. **Proceedings**. Recife: 2007

(a) equipamento de ultra-som para medida de módulo de elasticidade

(b) medida de resistência à tração por compressão diametral

Figura A-10. 3 - Equipamentos para medida de módulo de elasticidade (a) e resistência à tração (b)

RESULTADOS COMPARATIVOS DO DESEMPENHO REOLÓGICO DOS AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS

As curvas de distribuição granulométricas comparativas, obtidas por difração a laser de baixo ângulo, são apresentadas na figura abaixo e confirmam que todas as areias utilizadas no estudo de argamassas apresentam distribuição granulométrica similar (Figura A-10. 4).

Figura A-10. 4 - Distribuição granulométrica das areias utilizadas na formulação de argamassas

A porosidade e a composição das misturas, segundo a proporção em massa de areia, cimento e filler são apresentadas na Tabela A-10. 1.

Tabela A-10. 1 - Porosidade e proporção das fases para a composição das misturas

Fases e porosidade da mistura	Densidade (g/cm ³)	Proporção em massa (%)						
		areia natural	areia artificial	RCD	VSI-PB	Atrição -PB	Mesa-PB	RERoll
Porosidade (%)		0,6	1,0	19,3	11,7	10,3	8,2	5,7
Filler	2,73	12,8	12,2	12,9	12,8	12,8	12,8	12,9
Cimento	3,10	14,4	13,7	14,5	14,4	14,4	14,4	14,5
Ref natural	2,65	72,9						
Ref. artificial	2,80		74,1					
RCD	2,62			72,6				
VSI-PB	2,64				72,8			
Atrição-PB	2,66					72,8		
Mesa-PB	2,65						72,8	
RERoll-PB	2,68							72,7
Total		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Determinação do consumo de água

Inicialmente as misturas foram realizadas com proporção de água fixo em 29%, em volume (15% em massa), por ser suficiente para torná-la uma suspensão contínua, com comportamento de uma argamassa simples (sem nenhum aditivo) tais como as formulações preparadas em obra. As curvas de mistura para esta condição são apresentadas na Figura A-10. 5.

Figura A-10. 5 - Curvas de mistura para argamassa com proporção de 29% de água em volume

Para o mesmo conteúdo relativo de água, as demais misturas permaneceram com níveis de torque elevados e aspecto de "farofa" (torque não decresce), demonstrando necessidade de mais água para adquirir consistência de argamassa. Pelas curvas de mistura verifica-se que o nível de torque final cresce para areias recicladas segundo diferentes rotas de processamento, na seguinte sequência: Ref natural < RERoll-PB < Atrição-PB < Mesa-PB < VSI-PB < RCD.

Em um segundo momento, foi determinado o conteúdo de água para que cada mistura atingisse o mesmo nível de torque da areia de referência (Ref natural), ou seja, para que cada argamassa tivesse uma condição semelhante de trabalhabilidade. As curvas de mistura com o mesmo nível de torque e os respectivos conteúdos de água, em massa, são apresentadas na Figura A-10. 6.

Figura A-10. 6 - Curvas de mistura de argamassa com diferentes proporções de água

O consumo de água da argamassa formulada com a areia de referência artificial (15,4% em massa) é apenas ligeiramente maior do que da argamassa com areia de referência natural (15% em massa). O consumo de água da argamassa com a areia RCD é extremamente elevado (27% em massa), sendo 79% maior do que a argamassa de referência. No entanto, o conteúdo de água necessário para a mesma trabalhabilidade da mistura é decrescente para os produtos britados das areias do VSI.

O conteúdo de água para as misturas formuladas com os produtos do VSI-PB, atrição-PB e mesa-PB é igual e superior ao da areia de referência, mas inferior ao da areia RCD. Deve-se notar que o produto não-magnético da separação em RE-

Roll gerou uma argamassa com o menor conteúdo de água dentre as areias recicladas (19% em massa).

Avaliação das propriedades mecânicas

A densidade aparente, o módulo de elasticidade e a resistência a tração por compressão diametral são apresentadas, respectivamente na Figura A-10. 7, Figura A-10. 8 e Figura A-10. 9. Observa-se que em função do maior consumo de água nas argamassas com areia reciclada, as densidades e as propriedades mecânicas são significativamente menores do que em relação às argamassas com areias comerciais.

Todos os procedimentos de beneficiamentos aplicados (atrição, concentração densitária e separação magnética) melhoraram o resíduo no sentido de tornar seu comportamento em formulações de argamassa mais similar ao de agregados comerciais. Destaca-se a areia obtida pela separação em RERoll, que por resultar em uma argamassa com menor consumo de água favoreceu uma resistência maior em relação aos demais agregados reciclados (chegando a 73% do valor atingido pela areia de referência natural).

Figura A-10. 7 - Densidade aparente das argamassas após 7 e 28 dias de cura

Figura A-10. 8 - Densidade aparente e módulo de elasticidade das argamassas após 28 dias de cura

Figura A-10. 9 - Resistência mecânica à tração das argamassas após 7 e 28 dias de cura

Como as formulações só diferem entre si na areia utilizada, as propriedades mecânicas variam basicamente em função da porosidade do sistema que pode ser estimada pela soma dos volumes de água e ar no estado fresco, tal como verificado nos gráficos da Figura A-10. 10 e Figura A-10. 11.

Figura A-10. 10 - Resistência à tração por compressão diametral em função do teor de água em massa

Figura A-10. 11 - Resistência à tração por compressão diametral em função da proporção em volume de água+ar incorporado

O aumento do consumo de água nas argamassas está diretamente relacionado com a porosidade das fases e apresenta impacto direto na redução da resistência à tração e do módulo de elasticidade das argamassas.

A areia RCD apresenta consumo de água significativamente mais elevado (porosidade significativamente maior do que as areias processadas), já os produtos

do beneficiamento apresentam menores consumos de água e maior resistência mecânica à tração e maior módulo de elasticidade.

Não se observou diferenças significativas entre os produtos VSI-PB e Atrição-PB do ponto de vista reológico, inclusive porque as porosidades de ambos são muito semelhantes (11,7 e 10,3%, respectivamente).

Por outro lado, o produto pesado da concentração em mesa oscilatória e o produto não-magnético do RERoll apresentaram desempenho na reologia notadamente diferentes dos demais produtos. O produto britado não-magnético do RE-Roll é o que apresenta características mais semelhantes aos das areias comerciais (menor porosidade - 5,7%), seguido pelo produto pesado da mesa vibratória (porosidade de 8,2%).

Dessa forma, verifica-se que o processamento influencia as características do produto gerado com impacto na formulação das argamassas com agregados miúdos reciclados.