

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AREIA PRODUZIDA
A PARTIR DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO

Rafael Ribeiro de França

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn
Co-orientadora: MSc. Carina Ulsen

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2010/49)

SÃO PAULO
2010

TF
F814
RR.c

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AREIA PRODUZIDA
A PARTIR DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO

Rafael Ribeiro de França



Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn
Co-orientadora: MSc. Carina Ulsen

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2010/49)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900028374

SÃO PAULO
2010

TF
F814
RR.e

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AREIA FOSFATADA
A PARTIR DE REGIÕES DA COMBUSTÃO



Katell Ribeiro de França

Orientador: Prof. Dr. Henrique Lima
Co-orientador: Msc. Carlos César

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FUNDAMENTAÇÃO
(TT 2012/01)

SÃO PAULO
2012

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço meu orientador Prof. Dr. Henrique Kahn pela oportunidade de participar desse grande projeto dos agregados reciclados e pela chance de usufruir das dependências do Laboratório de Caracterização Tecnológica da Poli-Minas. Esses quase dois anos têm sido uma verdadeira jornada de novas descobertas para mim.

Aos funcionários do LCT pelo help na preparação das amostras: Erílio (juntos construímos e documentamos a maior pilha de agregados da história!), Vavá, Rose, Rafão, Alfredo, Douglas, Lino, Carlinhos, e Juscelino.

Aos pesquisadores do LCT Daniel, Ju, Mariane, André, Freud e Manuela pelos ensinamentos, vocês são verdadeiros exemplos para mim.

Aos meus companheiros e amigos estagiários de ontem e de agora: Vivi Jeba, Renata Churiço, Sheila Sertão (irmã!), Gustav, Iwamoto, Contessotto, Bruson, Renatô Higa, Lucas e Dri.

Aos meus amigos desses 5 anos (e meio...) de Geologia, em especial Angélica SemSal e Priscila Facinha, pelos inúmeros momentos divertidos (muitos deles às minhas custas...mas vocês sabem que eu não ligo) e por tornarem a graduação muito mais agradável.

Agradeço especialmente minha co-orientadora Msc. Carina Ulsen pelas injeções de otimismo diárias e por acreditar no meu potencial.

Por último, mas não menos importante agradeço minha mãe por ter investido tanto em prol do meu sucesso.

RESUMO

Os resíduos da construção civil representam um montante expressivo do total dos resíduos sólidos urbanos (acima de 50% em muitos casos), e como 90% de seus componentes são de origem mineral, são passíveis de serem reciclados através de processos industriais de beneficiamento.

A principal dificuldade na produção de areia reciclada de qualidade está relacionada à presença de pasta de cimento proveniente de construções anteriores nos agregados, por apresentar elevada porosidade e reduzir as capacidades mecânicas como durabilidade, elasticidade e resistência à compressão. Portanto, a caracterização e quantificação dessa fase são essenciais para a avaliação da qualidade do agregado reciclado, e uma das ferramentas propostas é através da caracterização microestrutural, foco do presente estudo.

O escopo do trabalho envolve a caracterização tecnológica de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição, por meio de separações de fases (minerais e outras), análises químicas, determinação do teor de pasta de cimento e detalhamento da composição mineralógica de cada produto analisado e das associações das fases por microscopia eletrônica de varredura. Como parte do projeto incluiu-se a definição dos procedimentos de preparação de amostras para confecção de seções polidas, estabelecimento de rotinas de análise ao MEV e tratamento dos dados por análise de imagens.

Os resultados demonstraram que a caracterização microestrutural por MEV-MLA mostrou-se uma ferramenta valiosa nos estudos de separabilidade de agregados miúdos reciclados, com potencial comprovado para determinação dos teores de pasta de cimento, bem como na avaliação da liberação desta em relação às fases minerais de interesse. As correlações estabelecidas e a coerência dos resultados apresentados demonstram a robustez e confiabilidade do procedimento estabelecido, de forma que pode ser utilizado como ferramenta de controle de qualidade na reciclagem de RCD na produção de agregados miúdos e na análise dos processos de produção adotados.

ABSTRACT

The construction and demolition wastes represent a significant amount of the total municipal solid waste (more than 50% in many cases). Their composition is basically from mineral origin (around 90% weight) and liable to be recycled through mineral processing.

The main difficulty on the production of high quality recycled sand is related to the presence of cement paste from previous constructions still adhered to the aggregates, which

is responsible for increasing the porosity of recycled aggregates and lessening the mechanical properties, such as durability, elasticity and compression resistance. Therefore, the characterization and quantification of this phase are essential for assessing the quality of the recycled aggregate, which is focus of this study, through microestrural characterization.

The scope of this work involves the technological characterization of fine aggregates produced from construction and demolition waste, through heavy liquid separations, chemical analyses, assessment of the cement pasta content, mineralogical composition and microestructural characterization by SEM-MLA to evaluate the phases associations and liberation from the cement paste. The procedures of sample preparation on polished sections, SEM acquisition setup and data analysis was part of scope of the present study.

The results proved that microestructural characterization by SEM-MLA is a valuable tool on separability studies of fine recycled aggregates, with demonstrated potential to determine the content of cement paste and to evaluate the liberation of mineral phases. The achieved correlations and the consistency of results show the robustness and reliability of the established procedure, demonstrating that it can be used as a tool for quality control on CDW recycling and on the analysis of the adopted production processes.

ABSTRACT

The construction and demolition waste (CDW) is a significant amount of the total municipal solid waste (more than 50% in many cases). This component is usually rich in mineral origin (around 50% weight) and has to be recycled through some processing. The main difficulty on the production of high quality recycled aggregate is the presence of cement paste from previous construction and demolition of the aggregate.

CONTEÚDO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO TRABALHO	2
2	FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	DEFINIÇÃO DE AGREGADOS	3
2.2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	3
2.3	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	4
2.3.1	<i>Peneiramento</i>	5
2.3.2	<i>Separações em líquidos densos</i>	6
2.3.3	<i>Difratometria de raios X</i>	6
2.3.4	<i>Análise de imagens</i>	7
2.3.5	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i>	7
2.3.6	<i>MLA - Mineral Liberation Analyser</i>	9
2.3.7	<i>Fluorescência de raios X</i>	10
2.3.8	<i>Estimativa do teor de pasta de cimento</i>	10
3	MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1	AMOSTRAGEM	12
3.2	ATIVIDADES LABORATORIAIS	12
3.3	PENEIRAMENTO	13
3.4	SEPARAÇÃO EM LÍQUIDOS DENSOS	14
3.5	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	15
3.6	ESTIMATIVA DO TEOR DE PASTA DE CIMENTO	15
3.7	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	16
3.8	CONFECÇÃO DE SEÇÕES POLIDAS	16
3.9	ESTEREOMICROSCOPIA	17
3.10	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	17
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	19
4.1	CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS	19
5	RESULTADOS	21
5.1	AMOSTRA ESTUDADA	21
5.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO	21
5.3	SEPARAÇÃO EM LÍQUIDOS DENSOS	22
5.4	ANÁLISE QUÍMICA	22
5.5	ESTIMATIVA DO TEOR DE PASTA DE CIMENTO	23
5.6	ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	25
5.7	OBSERVAÇÃO EM LUPA ESTEREOSCÓPICA	27
5.8	CARACTERIZAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES POR MEV/MLA	30
6	SUMÁRIO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	39
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

APÊNDICE 1 - IMAGENS DE MAPEAMENTO DE RAIOS X

APÊNDICE 2 - IMAGENS DIGITAIS MEV-MLA

APÊNDICE 3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO EM LÍQUIDO DENSO

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

1 INTRODUÇÃO

A construção civil consome de 14 a 50% de todos os recursos naturais extraídos no planeta (John, 2000). Na Inglaterra, por exemplo, o índice per capita atinge 6.000 kg/ano (Hobbs e Hurley, 2001). No Brasil, os agregados naturais estão entre os bens minerais mais consumidos sendo 90% da produção destinado à construção civil (Whitaker, 2001).

O consumo de areia para a construção foi por volta de 225 milhões de toneladas no ano de 2002. A Região Metropolitana de São Paulo representa um grande mercado consumidor (Rangel et al., 1997), já sendo observada a exaustão das jazidas de areia na região; como consequência tem-se o aumento da distância de transporte da matéria-prima (Whitaker, 2001).

Além do consumo excessivo de matérias-primas naturais não renováveis, os impactos ambientais relacionados à mineração de agregados são relevantes, principalmente para a areia em que cerca de 90% é extraída de leitos de rios (Almeida e Silva, 2005). A existência de áreas degradadas e o crescente conflito com o crescimento das cidades aumentam as restrições nas regulamentações ambientais da atividade. Além disso, o transporte de agregados naturais para abastecer a demanda da RMSP (Região Metropolitana de São Paulo) chega a 1,35 milhões de viagens/ano ou 5.000 viagens/dia (Coelho, 2001), contribuindo com queima de combustível fósseis e emissão de CO₂.

Do mesmo modo, os resíduos da construção civil representam um montante expressivo do total dos resíduos sólidos urbanos (cerca de 50%, ou mais em muitos casos - (Hendriks, 2000; John, 2000). A reciclagem, nesse caso, é imprescindível para a sustentabilidade do setor, além de economicamente interessante e tecnicamente viável. No entanto, este não é ainda o cenário vigente, nacional e internacionalmente, principalmente devido à baixa qualidade dos produtos gerados nos processos de reciclagem e à falta de métodos de controle de qualidade dos produtos.

Para superar tais barreiras e garantir a aplicação de agregados reciclados de RCD em diversos ramos da construção civil, é importante que estes resíduos sejam adequadamente processados através de operações unitárias otimizadas de beneficiamento mineral. Para tal, o conhecimento das propriedades destes materiais é imprescindível (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009) e podem ser adquiridos através das ferramentas de caracterização tecnológica. Destas ferramentas, uma profunda discussão é abordada por (Ulsen, 2006), entretanto as informações referentes às associações das fases presentes no agregado reciclados são escassas. Além disso, os procedimentos para determinação da quantidade de pasta de

cimento remanescente em agregados reciclados é um campo da pesquisa em desenvolvimento e carente de procedimentos precisos e reprodutíveis.

1.1 Objetivos e relevância do trabalho

A pasta de cimento proveniente de construções anteriores é responsável pela elevada porosidade dos agregados reciclados, originando suas maiores deficiências (Barra e Vazquez, 1998; De Juan e Gutierrez, 2009): baixa densidade, elevada absorção de água, elevados valores 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. Portanto, a caracterização e quantificação dessa fase são essenciais para a avaliação da qualidade do agregado reciclado, embora não existam métodos normatizados para tal.

Adicionalmente, a caracterização das associações da pasta de cimento aos agregados naturais para avaliação da liberação destes (caracterização microestrutural) tem sido pouco considerada. Entretanto, se adequadamente desenvolvida e validada será uma ferramenta de grande valor para auxiliar as decisões dos processamentos de reciclagem adotados, tais como avaliação da eficiência dos mecanismos de remoção da pasta de cimento, seja por atrição ou aquecimento, concentração por meio de processos gravíticos, liberação por cominuição, entre outros e também como procedimento de controle de qualidade de produtos.

Esta pesquisa está inserida em um contexto mais amplo de desenvolvimento de tecnologias de processamento de resíduos de construção e demolição e desenvolvimento de novas aplicações para os produtos gerados; também é contemplada pelo grupo de pesquisa a definição de métodos para controle de qualidade dos produtos obtidos.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é caracterizar agregados miúdos reciclados a partir de resíduos de construção e demolição com detalhamento da composição mineralógica de cada produto analisado e das associações das fases por microscopia eletrônica de varredura. O escopo do projeto envolve o desenvolvimento de uma rotina de mapeamento das fases presentes em função da composição química das fases, em software de análise de imagens automatizada acoplado a microscopia eletrônica de varredura.

2 FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição de agregados

Segundo a norma (ABNT NBR 9935), define-se agregado como “*material sem forma ou volume definido, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto*”. Este pode ser natural, quando utilizado “*tal como encontrado na natureza, a menos de lavagem e seleção*” ou artificial quando “*resultante de processo industrial*”. Se obtido de rejeitos da produção industrial, mineração ou processo de construção ou demolição na construção civil pode ser chamado de agregado reciclado.

De acordo com a granulometria do material, os agregados podem ser subdivididos em agregado gráudo, que corresponde a “*material granular com pelo menos 95% em massa retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm conforme a (NBR NM ISO 3310-1)*”, ou agregado miúdo, “*material granular com pelo menos 95% em massa passante na peneira com abertura de malha de 4,75 mm*”, conforme a NBR acima citada. Adicionalmente, define-se que “*materiais pulverulentos são partículas minerais com dimensão inferior a 0,075 mm, inclusive os materiais solúveis em água presentes nos agregados*”.

Os agregados gráudos usualmente são obtidos através de um processo industrial de britagem de rochas seguida de peneiramento, ao passo que a maior parcela dos agregados miúdos é de origem natural (majoritariamente areia fluvial).

2.2 Resíduos de construção e demolição (RCD)

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

A reciclagem dos agregados gráudos tem sido alvo de investigações tanto no Brasil como na Europa (Angulo, 2005; Ulsen, 2006). Em 1995, pelo menos três usinas de reciclagem no mundo, localizadas nos Estados Unidos (estado da Flórida), na Áustria e na Holanda, já haviam implantado a jigagem como método de separação qualitativa dos resíduos minerais com menor quantidade de contaminação (Jungmann e Quindt, 1999). Já os estudos sobre a fração miúda são escassos, tendo em vista o dogma de que “*areias*

recicladas apresentam elevado teor de contaminantes, bem como alta porosidade e absorção de água, devendo ser evitadas em concretos”.

No entanto, alguns autores atentam para a importância da aplicação de agregados finos e têm obtido bons resultados (Miranda, 2005; Poon e Chan, 2007; Silva, De Brito *et al.*, 2008). O processamento por técnicas de tratamento de minérios dessa fração tem sido pouco investigado, embora (Hendriks, 2004) aponte algumas operações passíveis de serem aplicadas para a melhoria da qualidade da areia de RCD. Da mesma forma são poucos os trabalhos que investigam os procedimentos de caracterização desta fração, que representa de 40 a 60% em massa de resíduos brasileiros (Ulsen, Kahn *et al.*, 2010).

2.3 Caracterização tecnológica

A caracterização tecnológica é usualmente aplicada à indústria mineral. Compreende uma série de ensaios e análises laboratoriais, segundo seqüência de procedimentos e critérios planejados fundamentalmente em função do bem mineral ou matéria-prima em estudo (Sant’Agostinho e Kahn, 1997). Seu objetivo é a definição das principais propriedades do material, de modo a orientar à aplicação na indústria de transformação.

A caracterização tecnológica é realizada através de uma série de ensaios e análises laboratoriais, segundo seqüência de procedimentos e critérios planejados fundamentalmente em função do bem mineral em estudo. A partir das informações sobre minérios similares, obtidas em literatura e/ou operações mineiras, esboça-se um roteiro de procedimento (op. cit.), descrito a seguir:

1º Passo: levantamento de informações sobre o bem mineral e o(s) processo(s) beneficiamento aplicado em minérios e jazidas semelhantes;

2º Passo: dados sobre o bem mineral - informação orientativa - reunião de especificações de concentrados aplicadas por estas indústrias - faixas de teores desejados e elementos deletérios;

3º Passo: estabelecimento do método de estudo para o bem mineral em questão;

4º Passo: operações em laboratório: preparação de amostra, cominuição e classificação granulométrica e separações minerais. Estes ensaios são acompanhados do balanço de massa dos produtos gerados e análises químicas que resultam em um balanço metalúrgico; análises mineralógicas e formas de associações minerais também são relevantes.

Dentre os parâmetros avaliados nos estudos de caracterização tecnológica destacam-se a distribuição em massa e dos elementos de interesse por fração granulométrica. A distribuição em frações grosseiras ou finas depende das dimensões e

forma de associações dos grãos minerais e resistência a cominuição dos minerais; já as fases portadoras do elemento de interesse, na maioria das vezes, se distribuem de forma variável nos intervalos granulométricos. Daí a importância de se determinar os minerais portadores do elemento de interesse, a sua partição nas várias fases, e a distribuição destas fases na granulometria. Além das propriedades do mineral útil, são importantes os dados sobre os minerais de ganga para possíveis subprodutos, como também os elementos deletérios.

Os métodos tradicionais de caracterização tecnológica aplicados a agregados reciclados são: (a) determinação macroscópica da proporção entre concreto, materiais cerâmicos, alvenaria, materiais orgânicos e metal (Recommendation, 1994; Hendriks, 2000; DIN, 2002; ABNT, 2004); (b) medidas de suas propriedades físicas, tais como absorção de água; (c) análises para determinação dos teores de íons solúveis e sulfatos.

Esses métodos, entretanto, não trazem informações sobre a composição química e mineralógica dos agregados reciclados e outros parâmetros cruciais para o desempenho do concreto (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009), tais como o conteúdo de pasta de cimento remanescente (Etxeberria, Vazquez *et al.*, 2006), os teores de mica e argilominerais (Bianchini, Marrocchino *et al.*, 2005; Limbachiya, Marrocchino *et al.*, 2007).

O desenvolvimento de procedimentos de caracterização mais abrangentes é recomendado e necessário para maior controle da qualidade dos produtos gerados e aumento da confiabilidade na utilização de agregados reciclados, podendo inclusive levar ao diagnóstico de novas aplicações.

O conhecimento tecnológico destes agregados é fundamental, pois a granulometria, a mineralogia e a morfologia das partículas determinam onde podem ser aplicados e influenciam o comportamento dos concretos e argamassas (Gonçalves, Arthuso *et al.*, 2000), influenciando propriedades fundamentais, como trabalhabilidade, aderência e resistência mecânica.

Dentre os procedimentos recomendados, consideram-se fundamentais parâmetros como a composição química (Limbachiya, Marrocchino *et al.*, 2007), mineralógica (Bianchini, Marrocchino *et al.*, 2005), microestrutural (Miller e Lin, 2004; Nagataki, Gokce *et al.*, 2004) e densidade/porosidade (Ulsen, 2006), dentre outros discutidos a seguir.

2.3.1 Peneiramento

De acordo com (Chaves e Peres, 2006) peneiramento é a operação de separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada. Cada partícula tem a

possibilidade de passar ou de ficar retida neste gabarito, que podem ser grelhas de barras paralelas, telas de malhas quadradas, retangulares, alongadas, entre outras.

O peneiramento é dito "a seco" quando é feito com o material na sua umidade natural (que, entretanto, não deve ser muito elevada), ou "a úmido" quando o material é alimentado na forma de uma polpa ou recebe água adicional sobre os decks durante o peneiramento (Luz, Sampaio *et al.*, 2004).

2.3.2 Separações em líquidos densos

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

A separação em líquido denso baseia-se na capacidade ou não de sedimentação das partículas quando imersas em líquido de uma dada densidade (Sant'Agostinho e Kahn, 1997). Este método permite realizar separações em função da massa específica das partículas minerais (Sant'Agostinho e Kahn, 1997). Em função da granulação do material, a separação em líquidos densos pode ser feita de três maneiras (Browning, 1961; Parfenoff, Pomerol *et al.*, 1970): em béqueres, em funis de separação e em centrífuga.

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). Dessa forma, a distribuição das amostras nos produtos de separação em líquidos densos é concordante com a distribuição das amostras por intervalo de porosidade e logo, de absorção de água.

2.3.3 Difratomia de raios X

A difração de raios X (DRX), segundo (Cullity, 1978), é uma ferramenta utilizada para determinação de estruturas cristalinas, equilíbrio de fases, medida de tamanho de partícula e determinação de orientação de um cristal, entre outras.

Os raios X são ondas eletromagnéticas acompanhadas por um campo elétrico em flutuação periódica; na difração utiliza-se radiação de comprimento de onda na faixa de 0,5 a 2,5 Å. A difração de raios X pelos cristais resulta de um processo de espalhamento elástico dos raios pelos elétrons dos átomos, sem mudança do comprimento de onda, é o chamado espalhamento coerente segundo a lei de Bragg ($n\lambda = 2d \sin\theta$).

A difração resultante de um cristal, compreendendo posições e intensidades das linhas de difração, é uma propriedade física fundamental do cristal, servindo tanto à identificação como ao estudo de sua estrutura (Formoso, 1984). A forma e as dimensões da célula unitária determinam a posição angular das linhas de difração, e o arranjo dos átomos dentro da célula unitária determina a intensidade relativa dessas linhas.

2.3.4 *Análise de imagens*

Análise de imagem é a ferramenta que propicia a determinação das feições ou parâmetros avaliados na estereologia, sendo que esta última compreende o estudo das relações entre estruturas ou feições tridimensionais de uma amostra e seus parâmetros de medidas em imagens bidimensionais (Russ, 2007).

A digitalização de imagens pode ser compreendida como a transformação da imagem numa matriz de números, a qual pode ser matematicamente processada segundo diferentes algoritmos e matrizes, possibilitando a obtenção de dados quantitativos de objetos, feições ou microestruturas.

Em sistemas estáticos a aquisição de imagens pode ser realizada através de câmeras digitais (CCD) acopladas a “macroviewer” ou microscópios ópticos ou diretamente a partir de microscópios eletrônicos digitais. Sistemas dinâmicos, por sua vez, possibilitam a coleta de imagens relativas a fluxos de material particulado através de câmeras CCD em intervalos da ordem de nanosegundos, possibilitando, não só agilizar o procedimento de medida, mas principalmente eliminar o efeito de orientação de amostra.

Os parâmetros normalmente medidos podem ser subdivididos em duas classes fundamentais:

- medidas específicas, relativas a feições: área, perímetro, diâmetro, fatores de forma e posicionamento;
- medidas globais, relativas à amostra, não se atendo a detalhes de como seus componentes são individualmente organizados: fração volumétrica, densidade superficial, contigüidade, comprimento de intercepto médio, densidade linear.

2.3.5 *Microscopia eletrônica de varredura*

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica de caracterização microestrutural extremamente versátil na qual a interação de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área ou o microvolume de amostra, produz uma série de sinais que podem gerar imagens, as quais são utilizadas para caracterizar propriedades da amostra,

tais como sua composição, superfície topográfica, cristalografia, etc (Goldstein, Newbury *et al.*, 1992; Brandão, Cançado *et al.*, 2007).

Nesta técnica um fino feixe de elétrons é acelerado por uma diferença de potencial entre 0,2 a 40 kV e convergido, por meio de lentes eletromagnéticas, para a superfície da amostra resultando em interações entre os elétrons e o material, as quais podem ser divididas em duas classes:

- espalhamento elástico: afeta a trajetória dos elétrons dentro da amostra sem, no entanto, alterar a energia cinética dos mesmos. É responsável pelo fenômeno de elétrons retroespalhados (imagem de contraste de número atômico e difração de elétrons espalhados - EBSD);
- espalhamento não elástico: compreende diferentes interações em que há perda da energia cinética dos elétrons para os átomos da amostra, propiciando a geração de elétrons secundários (imagem de topografia), elétrons Auger, raios X (microanálise e mapeamento elementar) e catodoluminescência.

A integração de sistemas de análise de imagens na automação de microscópios eletrônicos de varredura (MEV) acoplados a espectrômetros de raios X por energia dispersiva – EDS tem por premissa a diferenciação de números atômicos entre as fases presentes, observada em imagem de elétrons retroespalhados 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; 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; 1990). Desde então, estes sistemas evoluíram de maneira substancial, ganhando cada vez mais espaço na caracterização de minérios por serem capazes de coletar uma grande quantidade de dados em curto espaço de tempo, gerando resultados estatisticamente mais confiáveis e precisos (Sutherland e Gottlieb, 1991; Fandrich, Gu *et al.*, 2007). Atualmente há dois sistemas de análise de imagens automatizada, para operação em MEV: QEMSCAN e MLA (*Mineral Liberation Analyser*), em que as fases presentes são identificadas e quantificadas pela conjugação entre o tom de cinza gerado pelas imagens de elétrons retroespalhados e a composição química pontual determinada pelo sinal de raios X.

2.3.6 *MLA - Mineral Liberation Analyser*

Com o avanço tecnológico da informática nas últimas décadas, as ferramentas para caracterização mineralógica baseadas em microscopia eletrônica de varredura evoluíram significativamente possibilitando hoje gerar dados estatísticos substancialmente mais robustos (Petruk, 1989; Sutherland e Gottlieb, 1991; Kahn, Mano *et al.*, 2002; Fandrich, Gu *et al.*, 2007). Sistemas modernos possibilitam detalhar as características qualitativas e quantitativas dos minerais, como composição química e mineralógica, textura e associações minerais, liberação, distribuição de partículas mistas, etc., de modo automatizado e em tempo relativamente curto.

O principal instrumento para análise de imagens automatizada é o programa MLA (*Mineral Liberation Analyser*), desenvolvido pela JKMRRC da Universidade de Queensland, apresentado pela primeira vez em 1997 (Gu e Napier-Munn, 1997). Baseado nos conceitos de Hall (1977), o sistema do MLA foi incrementado em 1996 e foi comercializado pela primeira vez em 2000.

O grande diferencial do MLA é o mecanismo que permite combinar análise de imagens por elétrons retroespalhados (BSE) com identificação de minerais à partir de espectros de raios X característicos. O uso de imagens por BSE para análise de grãos tem inúmeras vantagens. Na imagem por BSE, muito mais pontos são analisados com aproximadamente 819.200 bits obtidos em 100 segundos, já na análise por raios X apenas 60.000 podem ser obtidos, o que torna a análise por BSE muito mais rápida. A resolução também é maior na análise por BSE, entre 0,1 μm e 0,2 μm , enquanto na imagem gerada por raios X a resolução está entre 2 μm e 5 μm (Gu, 2003). Isso torna a análise de imagens por BSE extremamente útil nos casos em que as fases constituintes apresentam tons de cinza bem distintos. Por outro lado as análises por raios X são muito úteis para distinguir fases que possuem sobreposição de tons de cinza mas composições químicas diferentes. As análises por raios X podem ser realizadas por pontos, por área ou mapeamento completo, com tempos progressivamente maiores.

Os procedimentos de análise de imagens envolvem aquisição da imagem, tratamento da imagem, identificação dos minerais, segmentação das fases, deaglomeração das partículas (para determinações do grau de liberação), manipulação dos dados e interpretação dos resultados (Petruk, 1989).

Os resultados dados 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.

2.3.7 Fluorescência de raios X

Na espectroscopia por fluorescência de raios X a amostra é pulverizada e prensada ou fundida em botões, sendo então irradiada por raios X. A irradiação da amostra por um feixe primário emanado de um tubo de raios X possibilita a excitação aos elementos químicos em geral ($Z > 4$) com a emissão de luz na região do espectro eletromagnético correspondente aos raios X (0,1 a 100 Å) (Formoso, 1984).

A radiação resultante emitida pela amostra tem energia característica dos elementos presentes na amostra, cujas intensidades são proporcionais às suas concentrações. Para análise quantitativa são necessários procedimentos de calibração e comparação com padrões, podendo-se se fazer uso de espectrômetros com detector de comprimento de onda (WDS) ou de energia dispersiva (EDS).

A composição química pode ser utilizada como uma estimativa dos conteúdos de rocha e pasta de cimento nos agregados reciclados (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009). Para agregados graúdos, a determinação das fases presentes é feita por meio de seleção manual (ou catação; "*hand sorting*"), baseado em critérios de identificação visual. No entanto, este procedimento é sujeito à experiência do analista na separação de fases cimentícias e rochas recobertas por aglomerantes, e restrito à fração graúda de agregados.

Para agregados graúdos e miúdos, sem carbonatos, a informação da composição química, somada a resultados de análises por termogravimetria e ataque ácido, permite o estabelecimento de um método preciso de identificação das fases presentes, e passível de ser aplicado a qualquer fração granulométrica (Angulo, 2005).

2.3.8 Estimativa do teor de pasta de cimento

A pasta de cimento aderida, proveniente de construções anteriores, é responsável pela elevada porosidade dos agregados reciclados. Portanto, a caracterização e quantificação dessa fase são essenciais para a avaliação da qualidade do agregado reciclado.

Não existem métodos normatizados para determinação do teor de pasta de cimento em agregados reciclados, embora na literatura sejam descritos três procedimentos:

- *Tratamento com ácido clorídrico.* O método consiste em promover o ataque dos agregados reciclados por ácido clorídrico. O procedimento para estimar a quantidade de aglomerantes presentes foi validado por (Quarcioni e Cincotto, 2006)

para argamassas endurecidas e aplicado e discutido por Angulo e colaboradores (Angulo, 2005; Angulo, Ulsen *et al.*, 2009) para o cálculo do teor de pasta de cimento endurecida em diferentes amostras de agregado reciclado, pela reação com HCl a 33%. O método não pode ser aplicado em agregados de calcário, pois o ácido reage com o carbonato; já rochas, cerâmicas, argilominerais e micas são consideradas insolúveis (Grim, 1953; Steen e Borg, 2002);

- *Produção de um novo concreto.* O procedimento consiste na produção de um novo concreto, feito com agregado reciclado e um novo cimento colorido artificialmente. Dessa forma, a pasta de cimento do novo concreto é facilmente diferenciada;
- *Tratamento térmico.* O ensaio prevê ciclos seqüenciais de imersão do agregado reciclado em água fria e secagem em altas temperaturas. O choque térmico a que o agregado é submetido causa fissuras na pasta de cimento e torna fácil a sua remoção.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostragem

A amostragem para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada a partir do RCD britado na usina de reciclagem Urbem Tecnologia Ambiental (Figura 1), de São Bernardo do Campo, SP.

O material amostrado na usina foi cominuído em condições otimizadas para geração de areia reciclada segundo atividades desenvolvidas pelo grupo de pesquisa da Poli-USP. O produto então gerado, a areia reciclada, foi amostrado sucessivas vezes para obtenção de alíquotas de menores massas para os estudos de caracterização microestrutural.



Transportador de correia do material
britado



Pilha de produtos amostrados

Figura 1 – Fotografias da usina Urbem

3.2 Atividades laboratoriais

As etapas envolvidas na caracterização microestrutural dos agregados reciclados são sumarizadas na Figura 2 e detalhadas na seqüência.

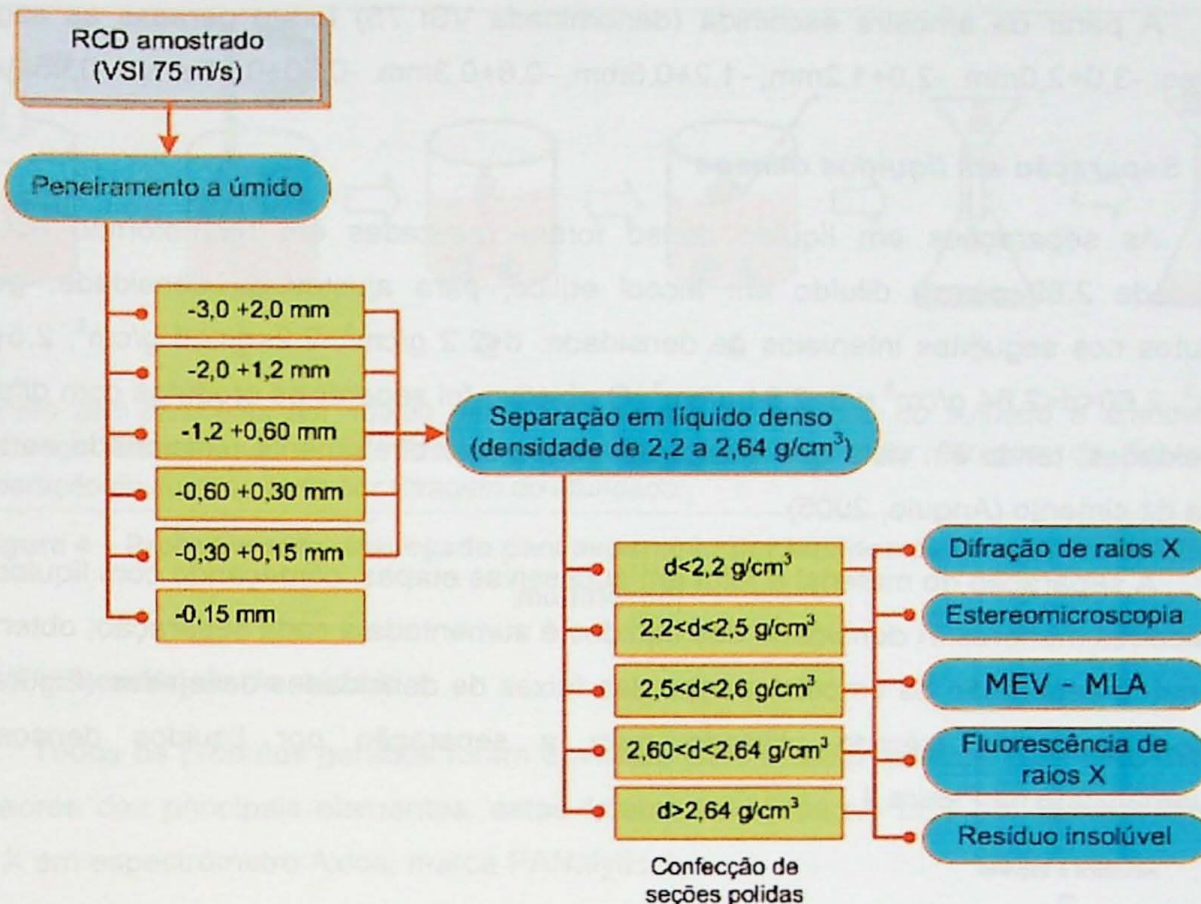


Figura 2 – Fluxograma contendo as etapas de caracterização do RCD

Para a caracterização microestrutural foram selecionadas vinte e cinco amostras no total (Tabela 1), compreendendo todos os produtos da separação granulométrica e por líquidos densos do produto de cominuição denominado VSI 75.

Tabela 1 – Relação de amostras caracterizadas ao MEV

	Produtos da separação em líquidos densos				
	d < 2,2	2,2 < d < 2,5	2,5 < d < 2,6	2,6 < d < 2,64	d > 2,64
Frações granulométricas	-3,0+2,0	-3,0+2,0	-3,0+2,0	-3,0+2,0	-3,0+2,0
	-2,0+1,2	-2,0+1,2	-2,0+1,2	-2,0+1,2	-2,0+1,2
	-1,2+0,6	-1,2+0,6	-1,2+0,6	-1,2+0,6	-1,2+0,6
	-0,6+0,3	-0,6+0,3	-0,6+0,3	-0,6+0,3	-0,6+0,3
	-0,3+0,15	-0,3+0,15	-0,3+0,15	-0,3+0,15	-0,3+0,15

3.3 Peneiramento

Devido à granulometria predominantemente fina do material estudado (fração areia; abaixo de 4,8 mm) e à elevada proporção de finos (abaixo de 0,15 mm), o peneiramento foi realizado por via úmida.

A partir da amostra escolhida (denominada VSI 75) foram geradas as seguintes frações: -3,0+2,0mm, -2,0+1,2mm, -1,2+0,6mm, -0,6+0,3mm, -0,30+0,15mm e -0,15mm.

3.4 Separação em líquidos densos

As separações em líquido denso foram realizadas em bromofórmio (CHBr_3 – densidade $2,89 \text{ g/cm}^3$) diluído em álcool etílico, para ajustes da densidade, gerando produtos nos seguintes intervalos de densidade: $d < 2,2 \text{ g/cm}^3$, $2,2 < d < 2,5 \text{ g/cm}^3$, $2,5 < d < 2,6 \text{ g/cm}^3$, $2,60 < d < 2,64 \text{ g/cm}^3$ e $d > 2,64 \text{ g/cm}^3$. O objetivo foi separar os produtos com diferentes porosidades, tendo em vista que esta propriedade está diretamente relacionada ao teor de pasta de cimento (Angulo, 2005).

A separação do material é feita em sucessivas etapas, começando com líquidos com densidades menores. A densidade dos líquidos é aumentada a cada separação, obtendo-se, ao final, a separação da amostra dentro das faixas de densidades desejadas (Figura 3). O passo-a-passo do método utilizado para a separação por líquidos densos está esquematizado na Figura 4.

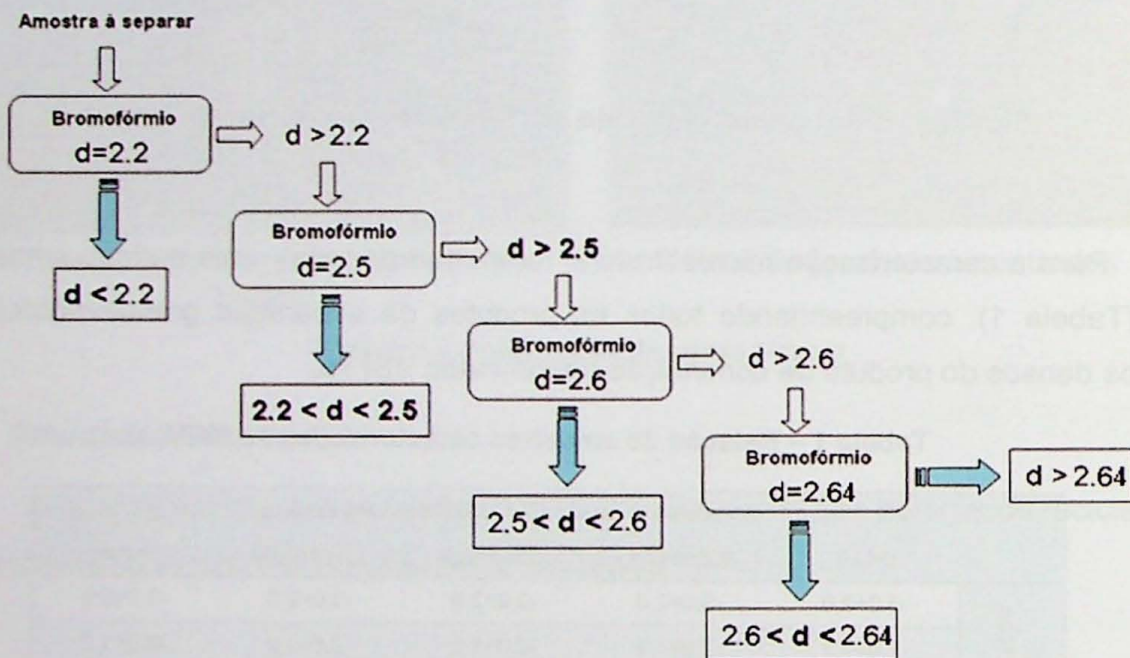


Figura 3 - Procedimento de separação por líquido denso

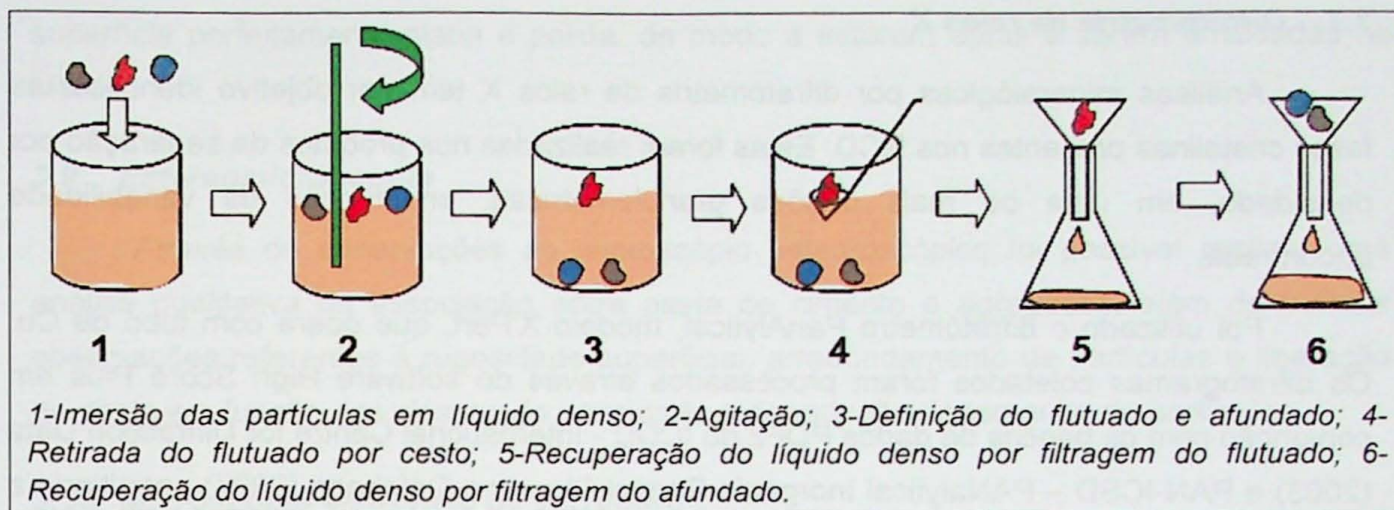


Figura 4 – Procedimento empregado para separação por líquidos densos (Angulo, 2005, modificado)

3.5 Fluorescência de raios X

Todos os produtos gerados foram enviados para análise química para determinação dos teores dos principais elementos; estas foram realizadas no LCT por fluorescência de raios X em espectrômetro Axios, marca PANalytical.

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

3.6 Estimativa do teor de pasta de cimento

O teor de pasta de cimento pode ser estimado pela determinação do resíduo insolúvel em ácido clorídrico. O procedimento foi elaborado por Quarcioni (Quarcioni e Cincotto, 2006) para reconstituição de traço de argamassas e confirmado para agregados reciclados por Angulo (Angulo, Ulsen *et al.*, 2009).

O procedimento envolve a reação de uma alíquota de material seco e finamente moído com solução de ácido clorídrico (HCl) a 33%. Em contato com HCl a porção da amostra formada por aglomerantes solúveis (pasta de cimento) reage, restando apenas uma porção composta essencialmente por argilominerais, quartzo e feldspatos denominada resíduo insolúvel (Quarcioni e Cincotto, 2006). O cálculo de RI será efetuado pelo quociente entre a massa final e a inicial secas a 100° C (em porcentagem).

A análise foi realizada nos vinte e cinco produtos obtidos, compreendendo as frações granulométricas e os produtos da separação por líquido denso.

3.7 Difratometria de raios X

Análises mineralógicas por difratometria de raios X tem por objetivo identificar as fases cristalinas presentes nos RCD. Estas foram realizadas nos produtos da separação por densidade, em uma ou mais frações granulométricas, em função da variabilidade encontrada.

Foi utilizado o difratômetro PanAnalytical, modelo X'Pert, que opera com tubo de Cu. Os difratogramas coletados foram processados através do software High Score Plus em conjunção com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007) permitindo a realização de análises qualitativas ou semiquantitativas pelo método RIR.

3.8 Confecção de seções polidas

Para os estudos de microscopia óptica e eletrônica foram confeccionadas seções polidas para os produtos separados por classes de densidade. Para tanto, um dos requisitos foi a definição da resina mais apropriada para os estudos propostos (resinas opacas, sem luminescência em luz ultravioleta).

Como se trata de procedimento não usual em caracterização de matérias-primas minerais foram avaliadas distintas resinas e corantes. Após a realização de testes com resinas de diferentes composições e tonalidades de pigmentação, 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 amostrado em amostrador centrífugo (para aumentar a 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 são submetidas a pressão em uma panela de pressão adaptada com mangueira de ar; aplica-se pressão de 3 bar durante 3 minutos aproximadamente e repete-se o processo por 4 vezes.

Para que as resinas endureçam é necessário aguardar aproximadamente 12 horas. Por fim, 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.

3.9 Estereomicroscopia

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

3.10 Microscopia eletrônica de varredura

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

Esse sistema possibilita a realização de análises qualitativas e quantitativas, aquisição de imagens, análise multiponto e de feições, varredura por linhas e mapeamento de raios X. Através desse sistema é possível mapear as partículas em função de sua composição química e por conseqüência avaliar a associação da pasta de cimento com os agregados reciclados, detectar a presença de cerâmicas, agregados calcários, micas e outras fases presentes.

Para a caracterização ao MEV, as seções polidas confeccionadas 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. Imagens ilustrativas dos mapas dos elementos químicos são apresentadas no Apêndice 1.

Posteriormente, a quantificação das fases e as respectivas associações foram determinadas pelo sistema de análise de imagens automatizada MLA. A análise das seções polidas foram feitas automaticamente após estabelecida uma rotina de configuração do microscópio para coleta de imagens e tratamento das imagens geradas.

Para identificação das fases mineralógicas presentes através de análise por raios X foi criado 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 padrão a ser seguido ao longo do projeto. Parâmetros como brilho e contraste foram mantidas constantes para todas as amostras, pois influenciam na identificação de fases pelo BSE.

Por padrão, 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, isso pode acarretar em perda de informações sobre fases de composição químicas distintas, vizinhas, mas que possuem tons de cinza muito próximos. Isso pode ser atenuado através do modo GXMAP, um recurso avançado de análise do MLA. O GXMAP possibilita maior discriminação de fases cujas tonalidades na imagem de BSE são muito semelhantes, como a cerâmica e a pasta de cimento, pois permite estabelecer um intervalo de cinza que será mapeado por raios X numa malha uniforme de pontos muito próximos sobre as partículas.

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, dentre outras.

4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

4.1 Cronograma das atividades realizadas

Este trabalho foi integralmente desenvolvido no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica. O estudo está inserido na linha de pesquisa "Produção de areia reciclada a partir de resíduos de construção e demolição", vinculado à área de caracterização e tratamento de resíduos.

Os resíduos foram amostrados e preparados por outros pesquisadores e alunos do grupo, com a participação do autor deste projeto, antes do período de desenvolvimento deste trabalho.

Este estudo envolveu procedimentos de caracterização inovadores para a aplicação proposta, não tendo sido verificado na literatura tal abordagem. Assim, o desenvolvimento do projeto encontrou diversas dificuldades, dentre as quais citam-se: inexperiência com o material estudado propiciando dificuldades no estabelecimento da rotina de aquisição de imagens ao MEV, dificuldades na preparação das seções polidas devido à elevada porosidade do material e à necessidade da utilização de resina opaca (procedimento não usual), composição muito variável e de difícil distinção entre algumas das fases tal como da cerâmica, diversas tentativas para ajuste do modo de operação do software de análise de imagens dinâmica (MLA) para melhor distinção das fases presentes. Ainda, apesar de publicado o método de estimativa do teor de aglomerantes, foi necessário um período de validação do método, a fim de se garantir a repetitividade e reprodutibilidade das análises.

As dificuldades encontradas eram esperadas dada a inexperiência de atuação na área, no entanto não foram impeditivas para a execução do trabalho apesar da elevada demanda de tempo e dedicação.

O cronograma de atividades seguido é apresentado na Tabela 2. Após a conclusão deste trabalho prevê-se a extensão dos estudos e análise crítica dos resultados para publicação de um artigo internacional.

Tabela 2 - Cronograma das atividades realizadas

Descrição das atividades / meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Após	
1 Revisão bibliográfica														
2 Amostragem na usina														
3 Amostragens secundárias														
4 Peneiramento														
5 Análises via úmida														
6 Separação em líquido denso														
7 Espectrometria de raios-X														
8 Difractometria de raios-X														
9 Resíduo insolúvel														
10 Preparação das seções polidas														
11 Microscopia óptica														
12 MEV + microanálise química														
13 Análise de imagens														
14 Análise crítica dos resultados														
15 Relatório final														
16 Publicação de artigo														

5 RESULTADOS

5.1 Amostra estudada

Conforme procedimento descrito anteriormente, a coleta de amostras foi realizada em uma usina de processamento de resíduos de construção e demolição, em São Bernardo do Campo. Foram coletados ao total cerca de 4.000 kg do produto da britagem primária, para diversos estudos de processamento das pesquisas em curso; a amostra total foi processada para geração de areia reciclada (linha de pesquisa de otimização nos processos de produção de agregados reciclados) em britador de impacto vertical.

O material estudado foi obtido por meio da amostragem da areia reciclada gerada, por meio de sucessivas etapas de homogeneização e amostragem por pilha alongada e amostrador Jones.

A amostra foi denominada VSI 75, devido ao processo pelo qual foi submetida (britagem em britador de impacto vertical, com velocidade de rotação do rotor de 75 m/s).

5.2 Análise granulométrica por peneiramento a úmido

A distribuição granulométrica resultante do peneiramento de uma alíquota representativa do produto amostrado está representada na Figura 5.

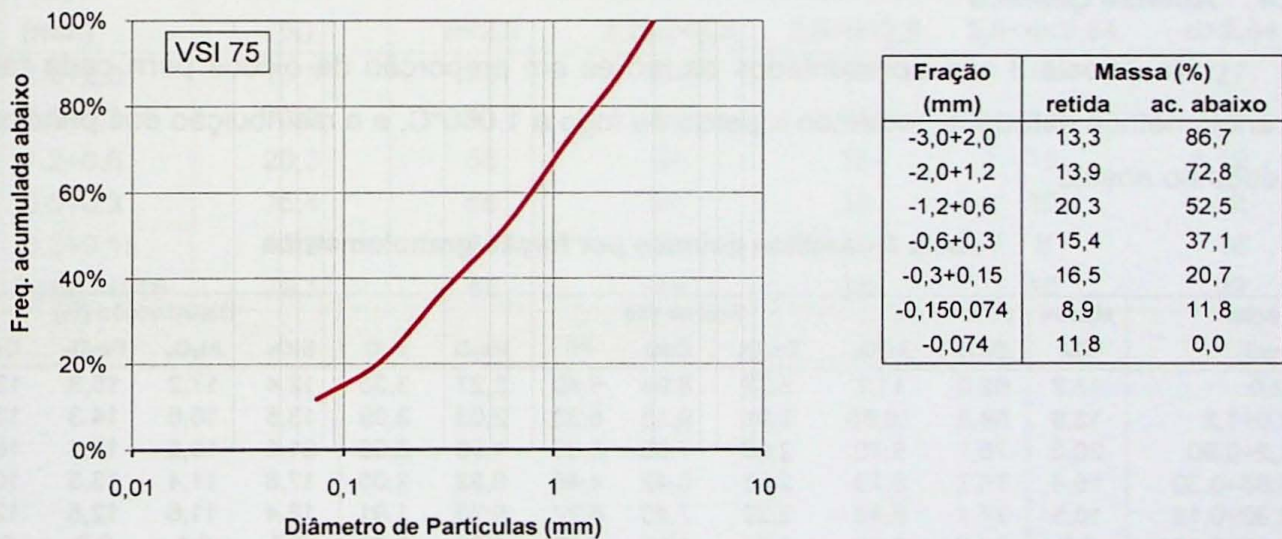


Figura 5 – Distribuição granulométrica por peneiramento a úmido

A distribuição granulométrica indica que a porcentagem em massa retida em +2,0 mm corresponde a 13,3% do total da amostra; já na fração passante em 0,074 essa proporção é de 11,8%.

5.3 Separação em líquidos densos

Os resultados de separação em líquidos densos são apresentados na Figura 6

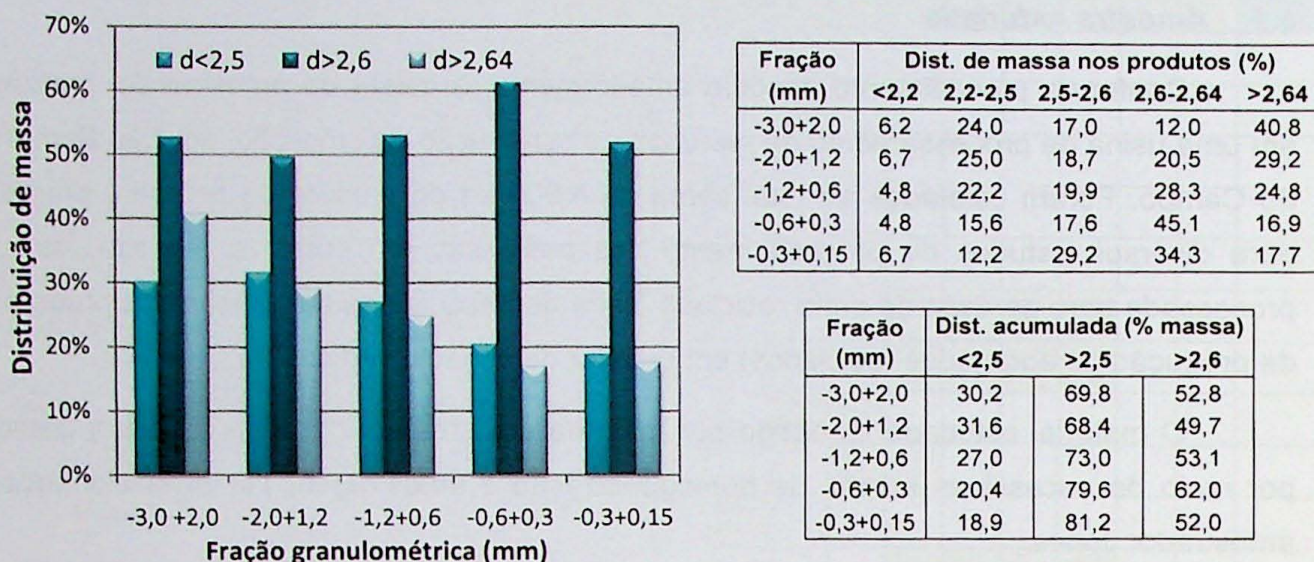


Figura 6 – Distribuição de massa nos produtos de densidade

Dos gráficos e tabelas pode-se concluir que a proporção em massa para densidades menores que $2,2 \text{ g/cm}^3$ é reduzida (de 4,8 a 6,7%), além disso, mais de 70% do material possui densidade superior a $2,5 \text{ g/cm}^3$. A proporção de material acima de $2,64 \text{ g/cm}^3$ decresce das frações mais grossas para as mais finas.

5.4 Análise química

Na Tabela 3 são apresentados os teores em proporção de óxidos para cada faixa granulométrica estudada, incluindo a perda ao fogo a 1.050°C , e a distribuição dos principais óxidos no ensaio.

Tabela 3 - Análise química por fração granulométrica

Fração (mm)	Massa (%)	Teores (%)							Distribuição (%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	PF	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
+2,0	13,3	62,0	11,7	3,37	8,93	6,40	2,27	3,30	12,4	17,2	15,3	12,6
-2,0+1,2	13,9	64,3	10,80	3,01	9,13	6,33	2,03	3,09	13,5	16,6	14,3	13,4
-1,2+0,60	20,3	70,7	8,70	2,66	7,68	5,39	1,39	2,55	21,6	19,5	18,4	16,4
-0,60+0,30	15,4	75,7	6,70	2,53	6,42	4,46	0,92	2,05	17,6	11,4	13,3	10,5
-0,30+0,15	16,5	74,1	6,40	2,22	7,40	6,22	0,73	1,91	18,4	11,6	12,5	12,9
-0,15+0,074	8,9	64,9	8,30	3,24	10,6	7,46	0,85	2,35	8,7	8,1	9,8	9,9
-0,074	11,8	43,8	11,9	4,02	19,5	15,0	0,86	2,28	7,8	15,5	16,2	24,3
Totais acumulados												
Total amostra	100,0	66,3	9,05	2,92	9,46	6,97	1,30	2,49	100,0	100,0	100,0	100,0
+1,2	27,2	63,2	11,2	3,19	9,03	6,36	2,15	3,19	25,9	33,8	29,6	26,0
-1,2+0,15	52,1	73,3	7,38	2,48	7,22	5,38	1,04	2,20	57,6	42,5	44,3	39,8
-0,15	20,7	52,8	10,4	3,69	15,7	11,8	0,86	2,31	16,5	23,7	26,1	34,3

Nota-se que os teores de sílica são progressivamente mais elevados com a diminuição granulométrica até atingir o ápice na fração 0,3 mm, à partir da qual há novo decréscimo, sendo esse teor muito menor na fração -0,074mm. Situação inversa ocorre nos demais óxidos, que apresentam menores teores no intervalo entre -0,60 mm e +0,15mm. Em relação à perda ao fogo, observa-se que um aumento nas duas últimas faixas granulométricas, notadamente na fração -0,074 mm.

À partir da análise química foi possível calcular a distribuição dos principais óxidos em cada faixa granulométrica, e observa-se predomínio da proporção de Al_2O_3 nas duas frações mais grossas. A sílica apresenta maior distribuição nas frações abaixo de 1,2 mm e acima de 0,15 mm, decrescente nas frações abaixo de 0,15 mm. Comportamento semelhante é observado para o Fe_2O_3 e CaO .

5.5 Estimativa do teor de pasta de cimento

De cada amostra foram retiradas pelo menos duas alíquotas de 1,0 g para reprodução do ensaio. Os teores de pasta de cimento aderida por produto são apresentados na Tabela 4, e comparados entre si na Figura 7.

Tabela 4 - Teores de pasta de cimento aderida em cada produto

Fração (mm)	Massa (%)	Teor de pasta de cimento aderida nos produtos (%)				
		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	13,3	50	34	17	13	27
-2,0+1,2	13,9	51	36	14	12	26
-1,2+0,6	20,3	58	34	16	10	19
-0,6+0,3	15,4	68	41	19	10	22
-0,3+0,15	16,5	81	50	15	8	18
Total +0,15	79,3	62	39	16	10	22

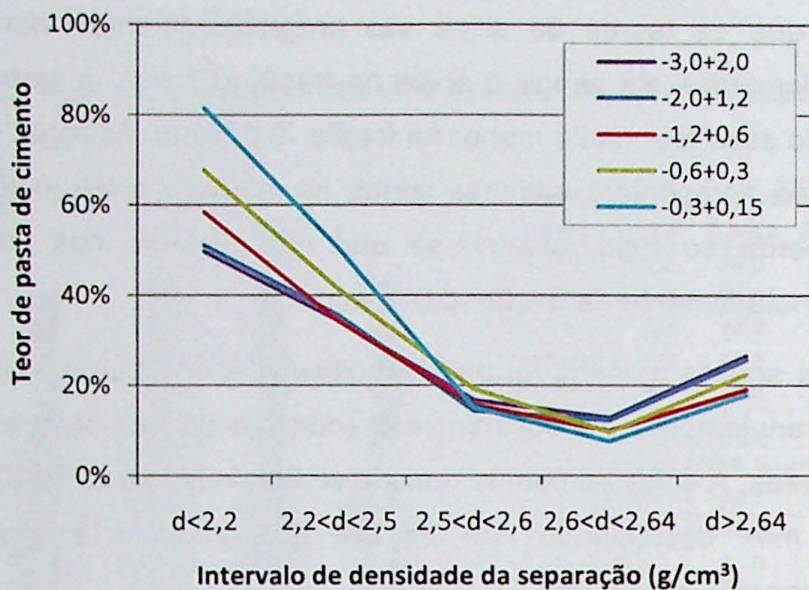


Figura 7 - Comparação entre teores de pasta de cimento por faixa de granulometria e densidade

O teor de pasta de cimento aderida (aglomerantes) diminui nos produtos de maior densidade. Porém, na faixa de densidade acima de 2,64 ocorre uma mudança nesse comportamento que é explicada pela presença de dolomita e não pela elevação no teor de aglomerantes, o que é corroborado pelas análises por DRX e MEV. Desse modo, considera-se o método do RI como restrito quanto à presença de agregados calcários.

Observa-se que nos produtos de densidade abaixo de 2,5 g/cm³, o teor de pasta de cimento tende a ser maior nas frações mais finas; já para os demais produtos de densidade os teores de aglomerantes se aproximam independente da fração.

Há uma relação linear (proporcional $R^2=0,99$) entre a perda ao fogo e o teor de aglomerantes (Figura 8); assim sendo, infere-se que grande parte dos voláteis presentes (água combinada e do CO₂), além do CaO, estejam diretamente associados aos aglomerantes.

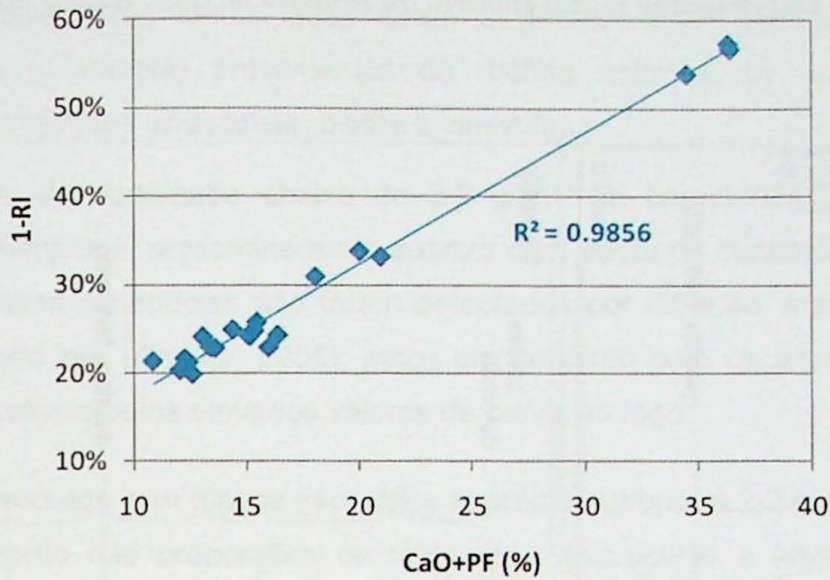


Figura 8 - Correlação entre os teores estimados de aglomerantes e a perda ao fogo

5.6 Análise mineralógica por difratometria de raios X

Difratogramas de raios X comparativos, para determinada fração granulométrica e nos diferentes produtos de separações minerais em líquidos densos são apresentados, respectivamente, na Figura 9 a Figura 11.

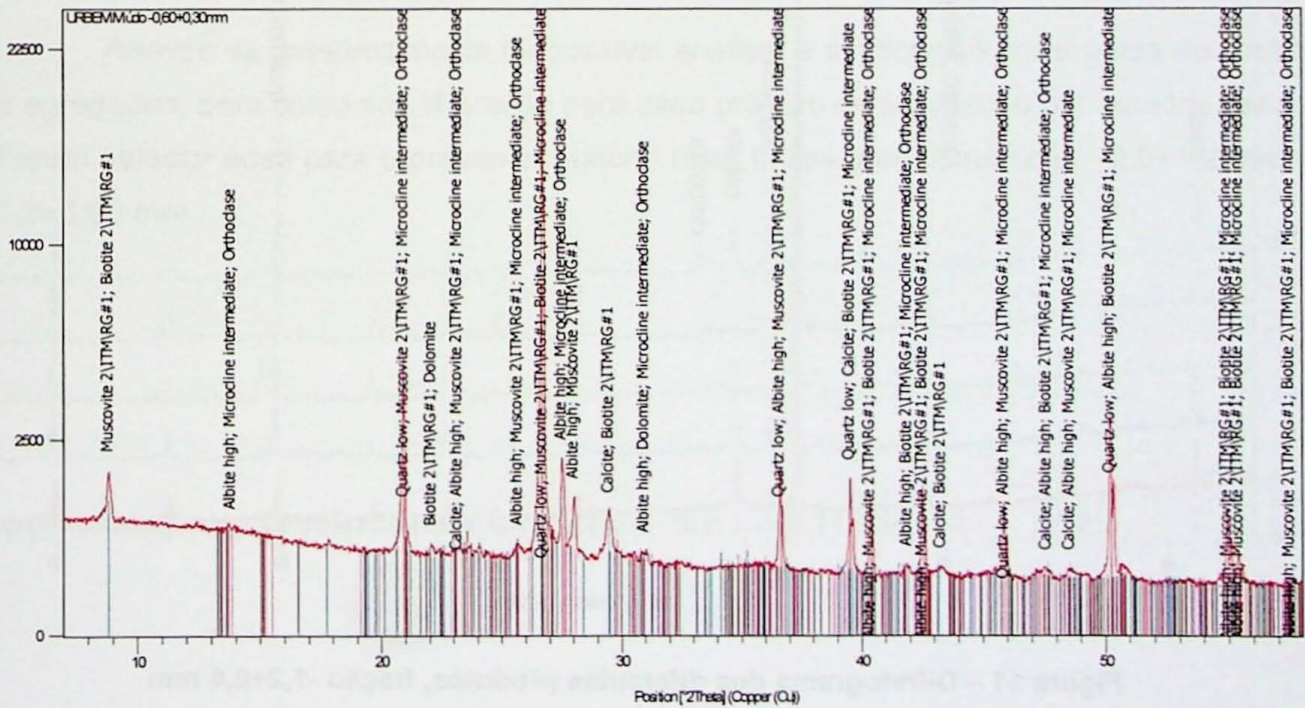


Figura 9 – Difratoograma representativo da amostra tal qual, fração -0,60+0,30 mm

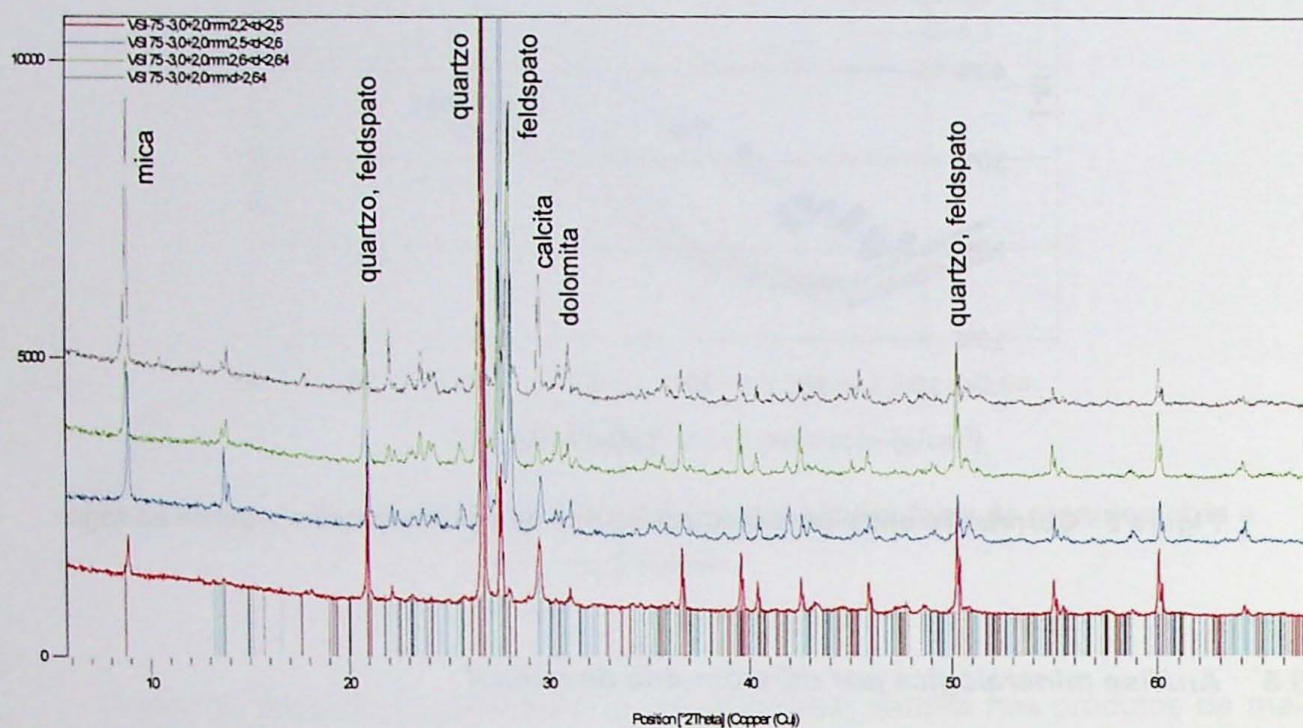


Figura 10 – Difratoograma dos diferentes produtos, fração -3,0+2,0 mm

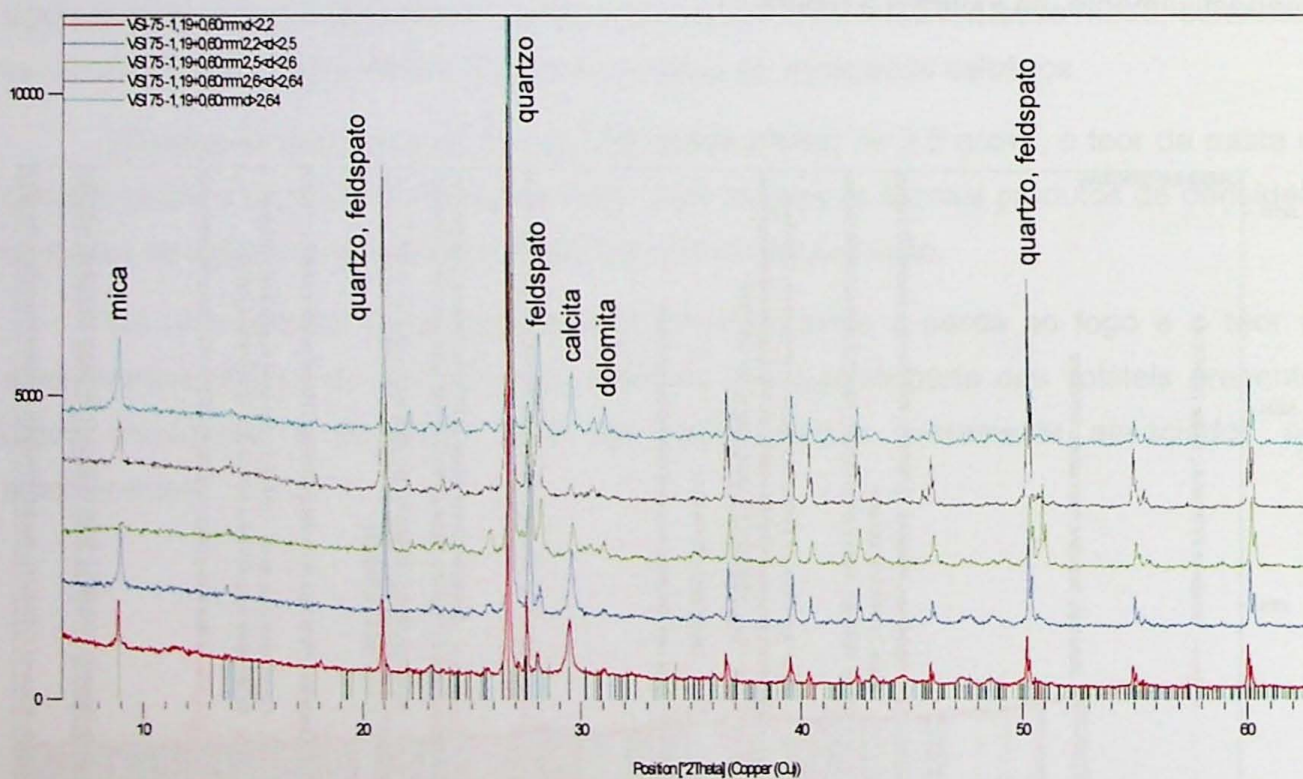


Figura 11 – Difratoograma dos diferentes produtos, fração -1,2+0,6 mm

As principais fases identificadas foram a) tectosilicatos (principalmente quartzo, albita, ortoclásio e anortita) provenientes de rochas naturais, b) carbonatos (calcita, dolomita) e c) filossilicatos (muscovita, biotita e caulinita).

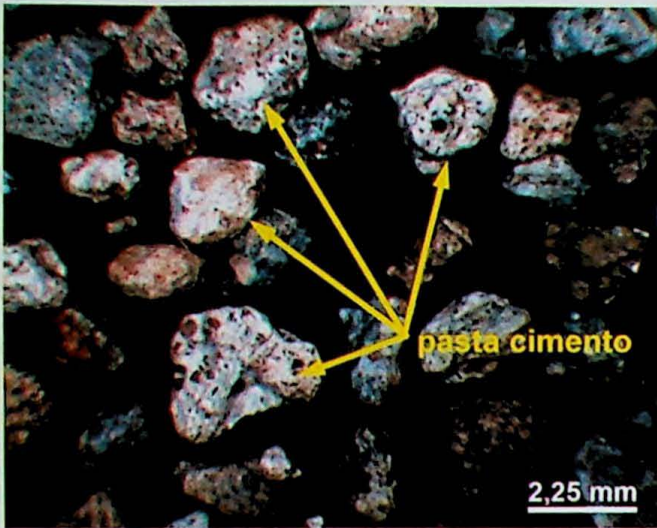
O produto de densidade abaixo de $2,2 \text{ g/cm}^3$ se caracteriza pela presença de aglomerantes cimentícios, argilominerais e quartzo com pasta de cimento aderida. Silicatos hidratados das fases cimentícias não foram detectados por difração, mas estão presentes conforme verificado por (Angulo, 2005); estes em conjunto com os argilominerais são os principais responsáveis pelos elevados valores de perda ao fogo.

Para os produtos com massa específica aparente superior a $2,2 \text{ g/cm}^3$ verifica-se um significativo aumento nas proporções de feldspatos (microclínio e albita) e de minerais micáceos, e redução de quartzo, argilominerais e carbonatos, indicando presença de agregados naturais (pedra britada). Somado a isso as análises de perda ao fogo e microestruturais confirmam a redução nas proporções de argilominerais e aglomerantes e presença de fragmentos líticos.

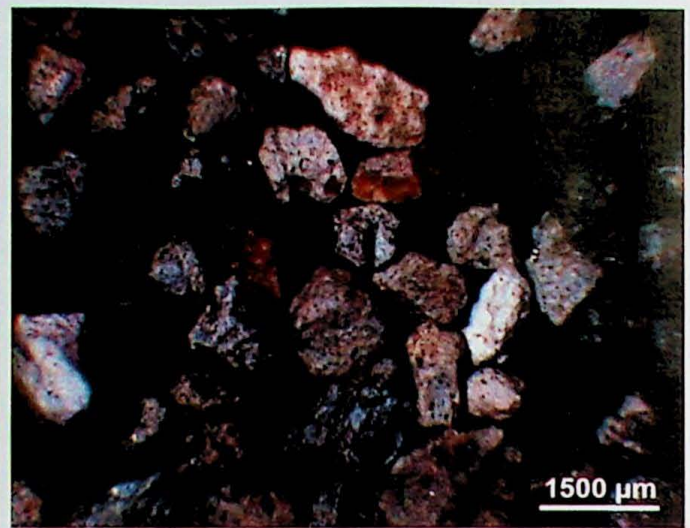
Feldspatos, tais como albita e ortoclásio/microclínio são encontrados em todas as frações, bem como calcita, mica (muscovita/biotita/flogopita) e quartzo. Nas frações mais finas ocorre um aumento significativo no teor de argilominerais, tais como caulinita; podem também estar presentes pequenas quantidades de crisotila e gibsita.

5.7 Observação em lupa estereoscópica

Através da estereoscópica foi possível analisar a associação entre pasta de cimento e agregados, bem como sua liberação para cada produto de separação por líquidos densos. Foram selecionadas para o presente relatório duas faixas granulométricas: $-2,0+1,2 \text{ mm}$ e $-1,2+0,60 \text{ mm}$.

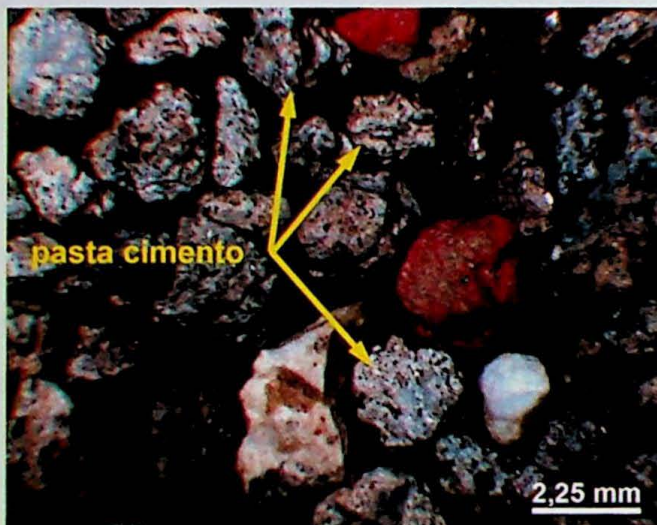


Produto $d < 2,2$ (-2,0+1,2 mm)

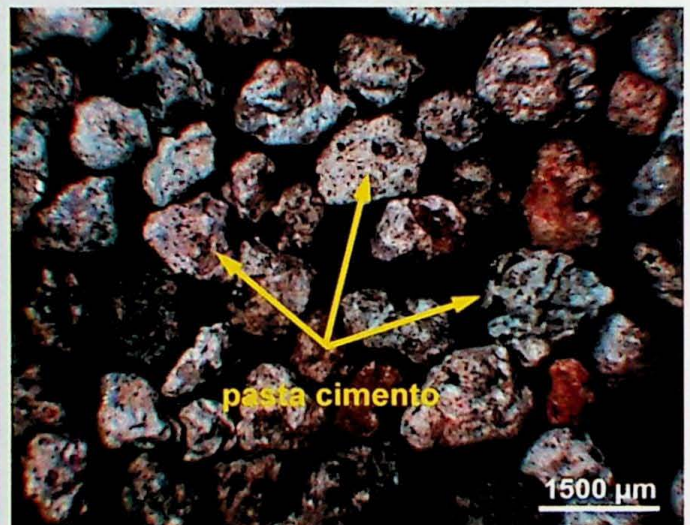


Produto $d < 2,2$ (-1,2+0,60 mm)

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. Os teores de CaO são confirmados nas análises de DRX e perda ao fogo.



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/cm^3 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.

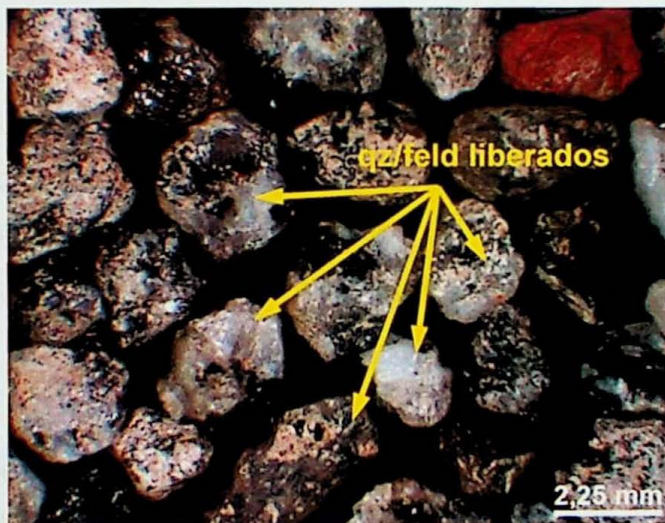


Produto 2,5<d<2,6 (-2,0+1,2 mm)

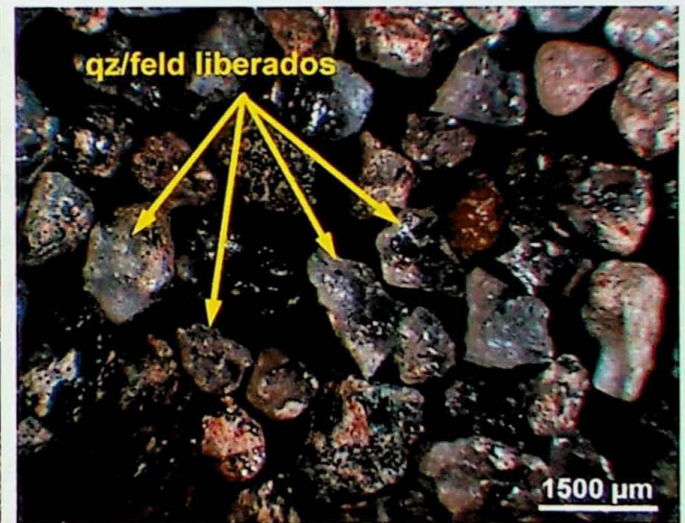


Produto 2,5<d<2,6 (-1,2+0,60 mm)

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.

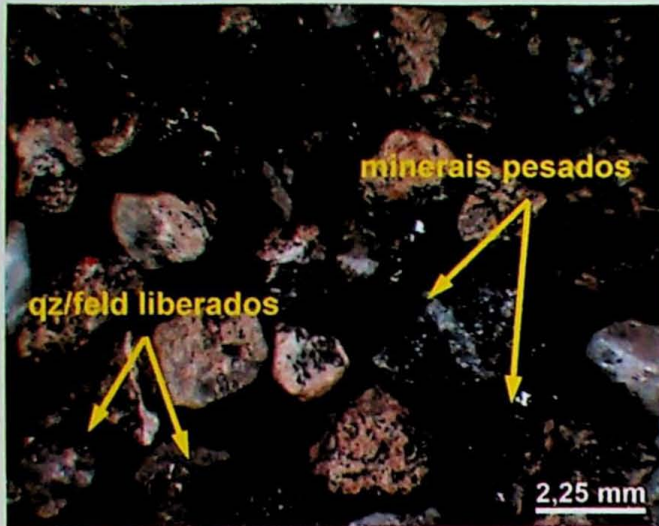


Produto 2,6<d<2,64 (-2,0+1,2 mm)

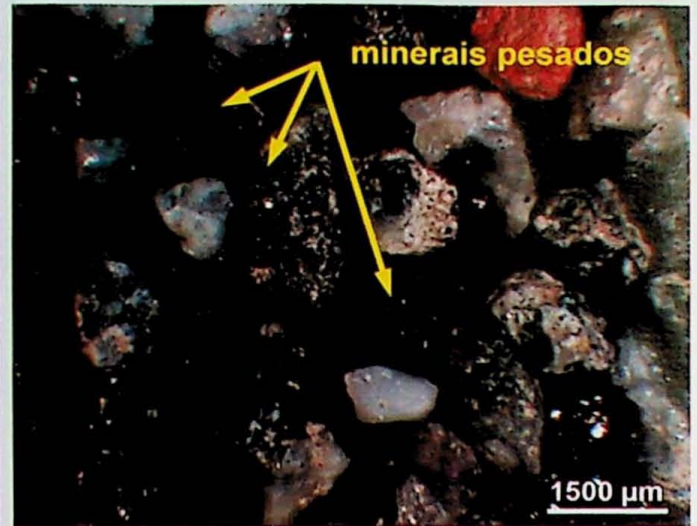


Produto 2,6<d<2,64 (-1,2+0,60 mm)

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.

5.8 Caracterização das associações por MEV/MLA

Imagens ilustrativas de algumas partículas obtidas por mapeamento por MEV-MLA são apresentadas no Apêndice 2. As composições mineralógicas médias determinadas por análise de imagens (MEV-MLA) dos produtos por fração granulométrica e as médias totais de cada fração são apresentadas na Tabela 5; a composição de cada produto da separação em líquido denso consta no Apêndice 3.

As principais fases presentes na amostra são quartzo, feldspatos e a pasta de cimento (Figura 12). As micas representam em média de 2 a 6% em massa e concentram-se nos produtos de maior densidade, especialmente em d>2,64, assim como os carbonatos e os minerais máficos (piroxênio e anfibólio). Já a cerâmica concentra-se no produto entre 2,2 e 2,6 g/cm³. Outros minerais são representados por apatita, hematita, ilmenita, titanita e zircão (Apêndice 3), e por isso seus conteúdos são maiores nos mais pesados.

A pasta de cimento varia de 8 a 15% e tem uma correlação de $R^2 = 0,94$ tanto com a soma do teor de CaO determinado por FRX com a PF a 1.050°C como com a estimativa do teor de aglomerantes determinada por ataque ácido (Figura 13). Essa correlação não é válida para o produto d>2,64 já que a estimativa do teor de pasta de cimento por CaO ou

lixiviação ácida é incoerente devido a presença de carbonatos, os quais elevam os teores de CaO determinado por FRX como também são solúveis em ácido clorídrico.

Nas frações acima de 1,2 mm o conteúdo de pasta no produto $d < 2,2$ é da ordem de 30-40% e os conteúdos de quartzo e feldspatos somam 50-60%; nas frações mais finas verifica-se um crescimento progressivo nos teores de pasta de cimento no produto mais leve, de 51%, 71% e 81%, indicando a liberação da pasta de cimento das fases minerais.

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 o feldspato com teores decrescentes de 36 para 16%, demonstrando concentração preferencial destes nas frações mais grossas, juntamente com os minerais máficos.

A separação por densidade gera produtos com reduzida quantidade de pasta de cimento e conteúdos de fases minerais (quartzo, feldspato, minerais máficos e outros) superiores a 90% (produtos $d > 2,5$).

Tabela 5 - Composição mineralógica dos produtos da separação em líquido denso (% massa)

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	
Total +2 mm						
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
micas	1,2	0,8	2,0	6,1	11	6,0
carbonatos	2,7	4,8	4,3	3,1	7,8	5,6
cerâmica	3,9	4,3	14	1,0	2,1	4,7
pirox-anfibólio	-	-	0,3	1,7	8,8	3,9
outros	0,3	0,4	0,4	0,9	2,0	1,1
Total +1,2 mm						
quartzo	46	57	39	62	32	47
feldspatos	6,1	17	43	31	34	29
pasta cimento	39	18	4,5	1,6	1,7	8,7
micas	1,1	1,0	1,1	2,3	12	4,5
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
pirox-anfibólio	-	-	1,1	1,1	5,2	1,9
outros	0,4	0,3	0,4	0,3	2,7	1,0
Total +0,6 mm						
quartzo	36	47	54	79	43	56
feldspatos	5,5	19	35	17	25	22
pasta cimento	51	22	4,7	1,2	1,4	9,1
micas	0,8	1,2	0,6	0,7	9,6	3,0
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
pirox-anfibólio	-	-	-	0,6	6,6	1,8
outros	0,5	1,0	0,2	0,1	2,5	0,9
Total +0,3 mm						
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
micas	0,8	1,6	0,6	0,3	10	2,3
carbonatos	1,8	2,3	1,0	0,2	9,7	2,4
cerâmica	3,3	3,4	3,8	1,3	2,8	2,4
pirox-anfibólio	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
Total +0,15 mm						
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
micas	0,7	1,7	0,7	0,4	9,4	2,3
carbonatos	2,3	3,6	1,1	0,5	8,1	2,5
cerâmica	2,7	5,7	3,2	1,0	3,3	2,7
pirox-anfibólio	-	-	-	0,9	7,7	1,7
outros	0,3	0,5	0,1	0,1	6,8	1,4

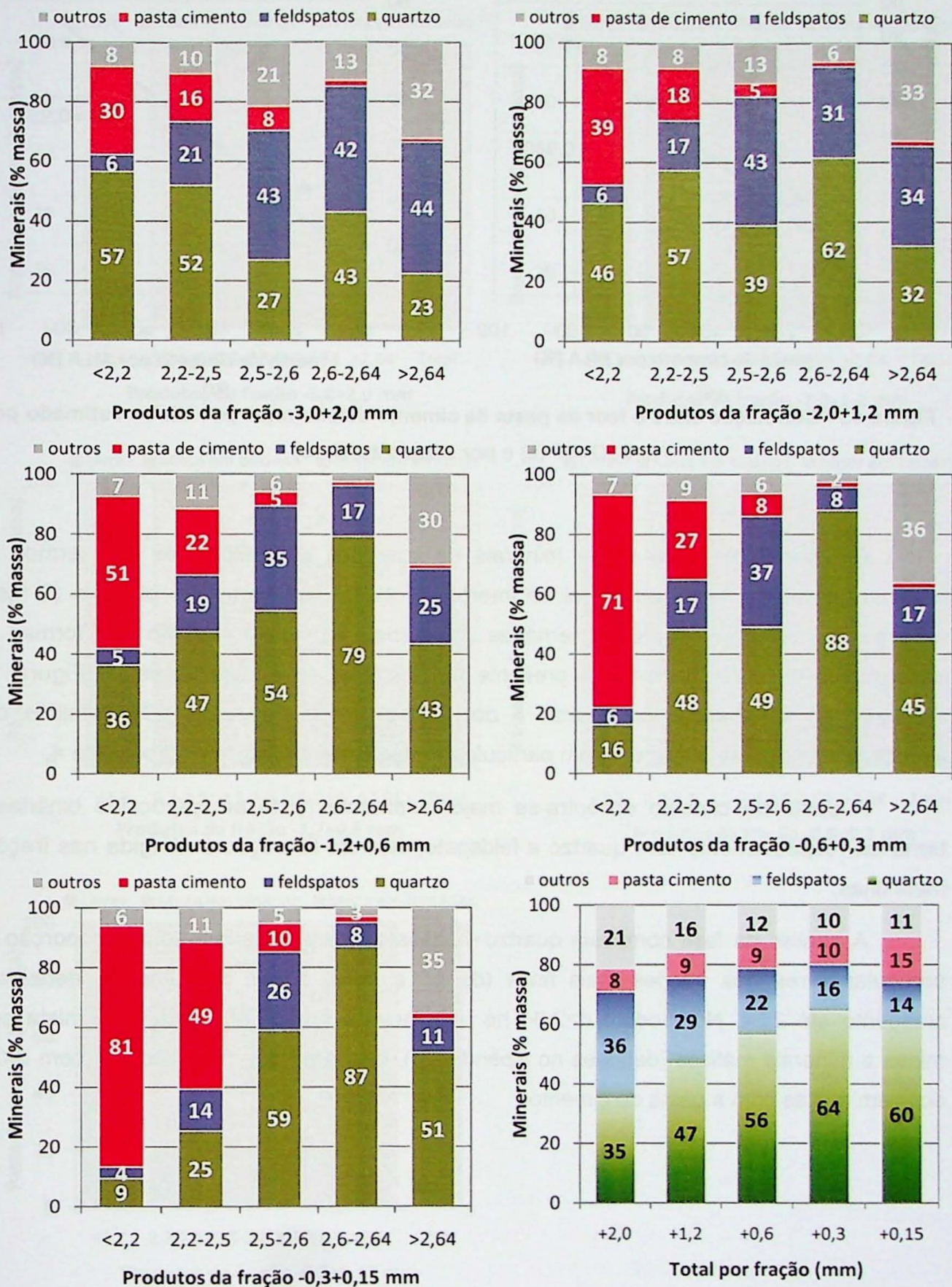


Figura 12 - Composição mineralógica média dos produtos

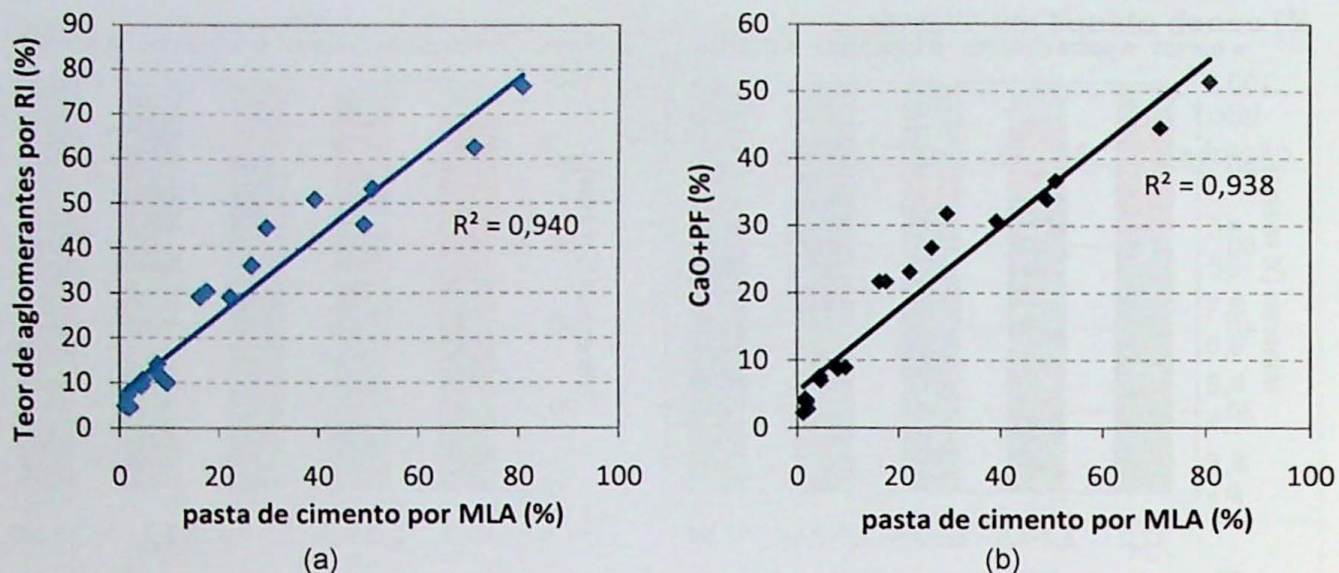


Figura 13 - Correlação entre o teor de pasta de cimento determinado por MLA e estimado por CaO+PF (a) e por ataque ácido (b)

As associações das fases minerais de interesse são expressas em termos de partículas livres (> 95% do mineral de interesse), mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e mistas em partículas ternárias (3 ou mais fases). O sumário das formas de associações da pasta de cimento presente na amostra são apresentadas na Figura 14, enquanto as associações do quartzo e dos feldspatos na Figura 15. Os detalhes das associações da pasta de cimento em partículas mistas estão expostos no Apêndice 4.

A pasta de cimento encontra-se majoritariamente mista em partículas binárias e ternárias, especialmente com quartzo e feldspato, discreta liberação é atingida nas frações mais finas.

A análise da fase composta quartzo+feldspato indica um aumento na proporção de partículas livres nas frações mais finas (de 25 a 63%) e nos produtos de densidade crescente até 2,64. No produto $d > 2,64$ há uma grande proporção desta fase mista com micas e minerais máficos (detalhes no Apêndice 3), enquanto que nos produtos com $d < 2,5$ ocorrem mistas com a pasta de cimento.

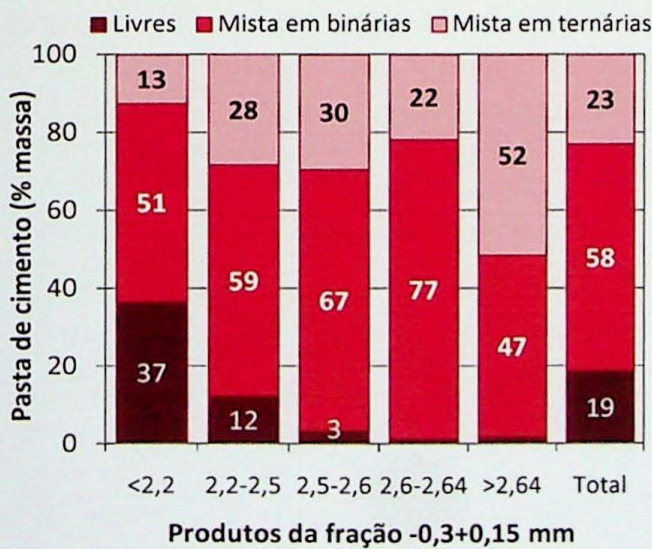
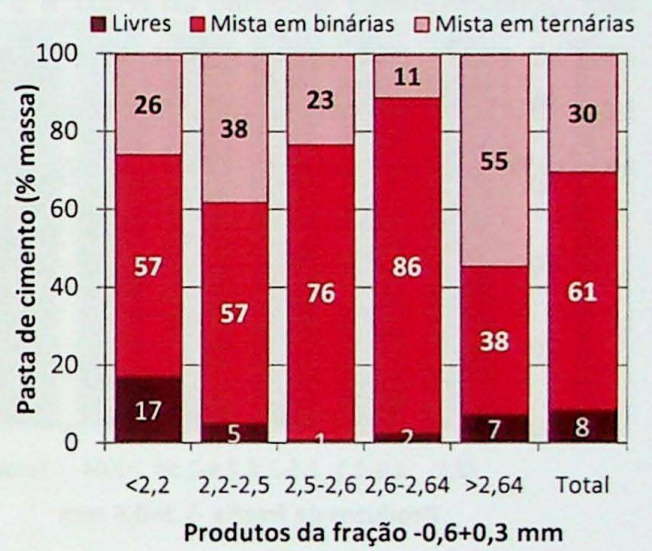
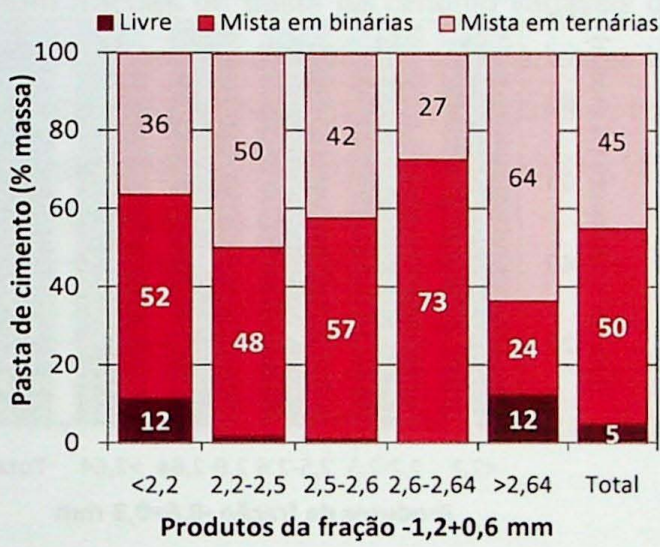
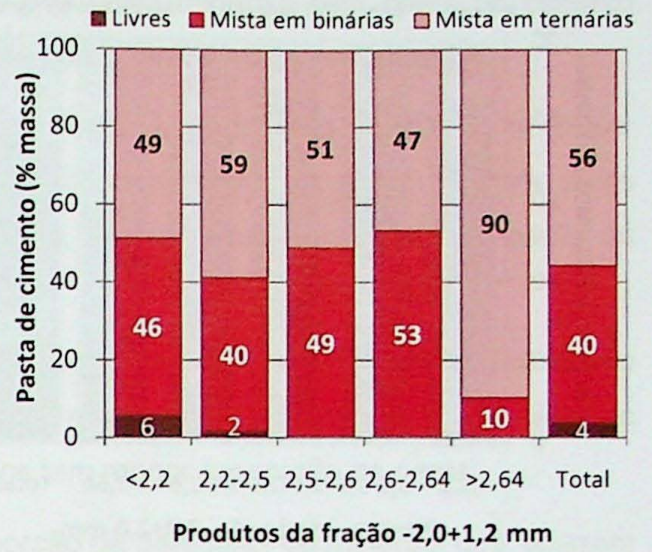
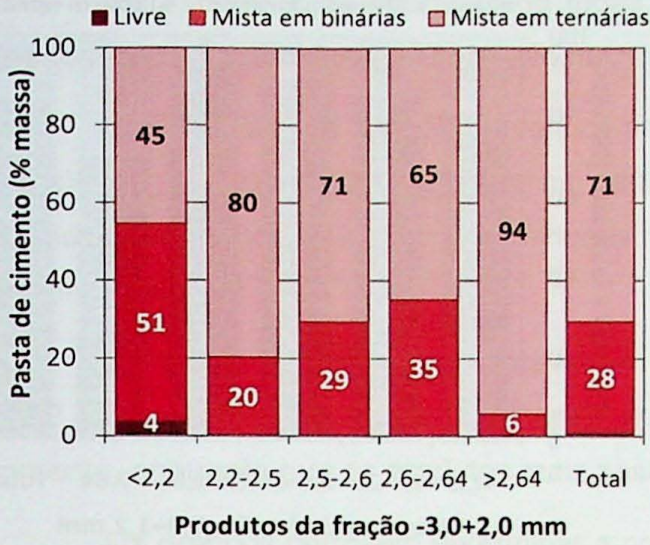


Figura 14 - Sumário das formas de associação da pasta de cimento

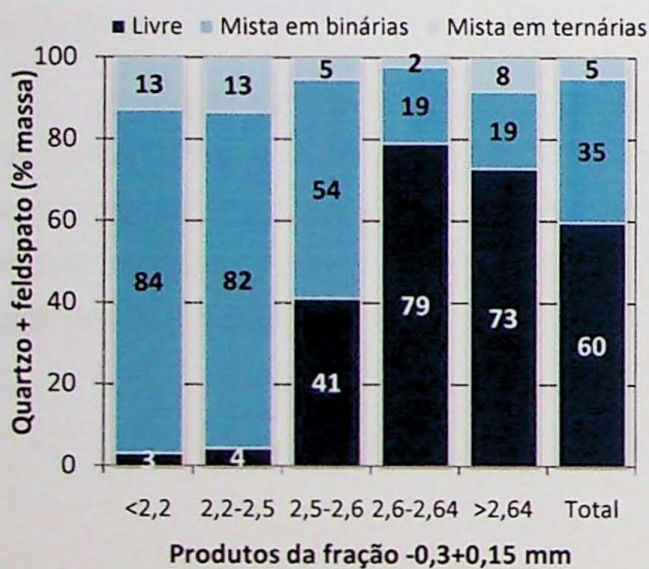
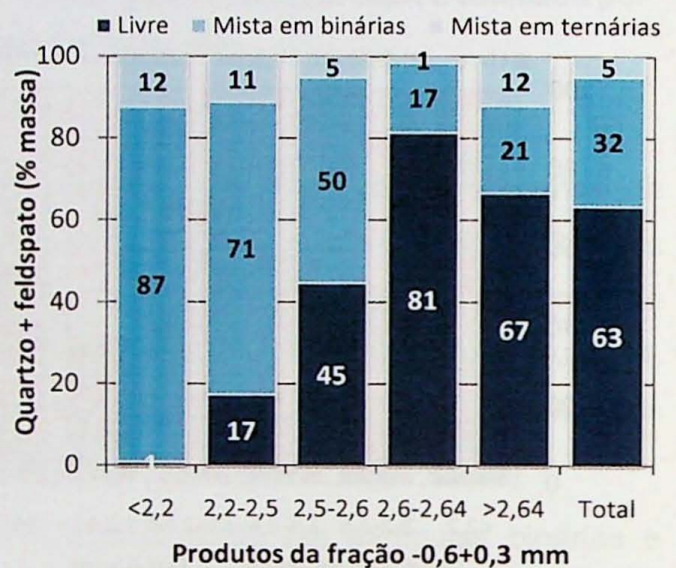
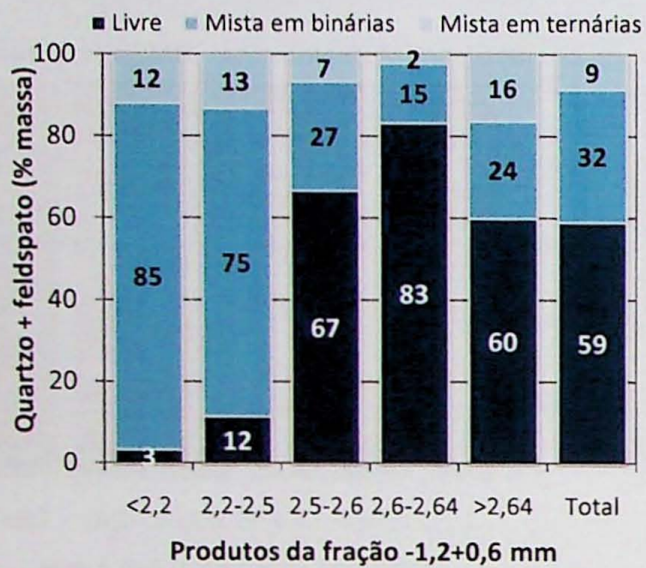
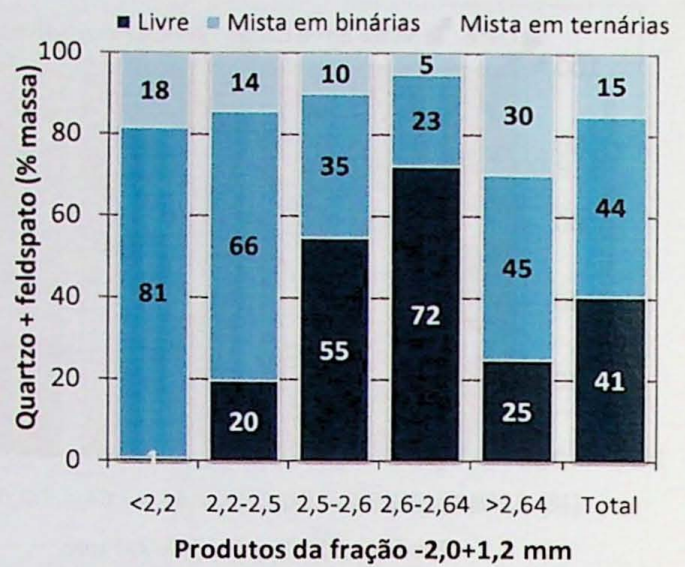
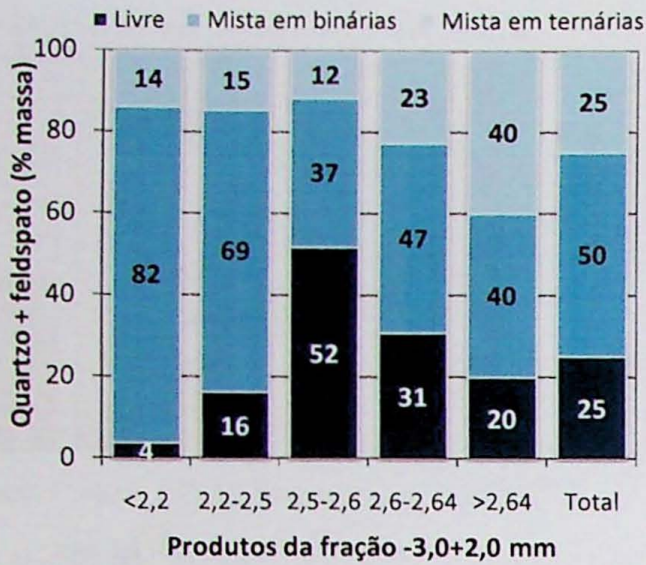


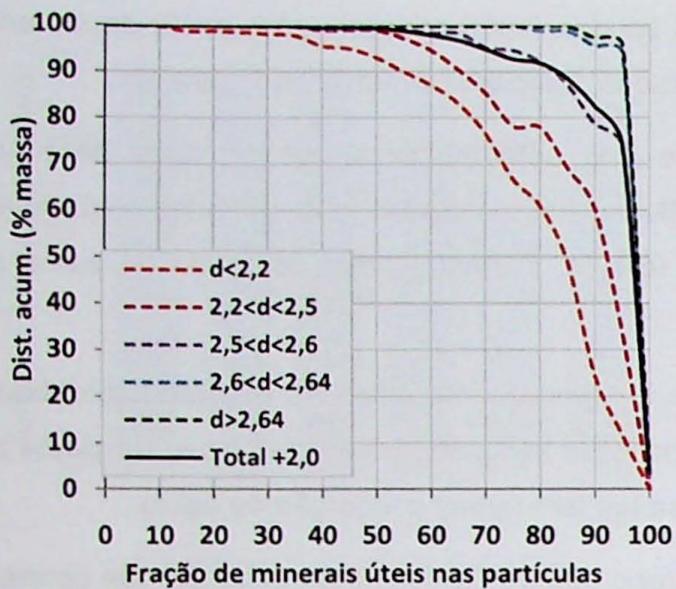
Figura 15 - Sumário das formas de associação da fase composta quartzo+feldspato

Os espectros de liberação de todas as das fases minerais sem pasta de cimento (denominadas aqui minerais úteis) são mostrados comparativamente na Figura 16.

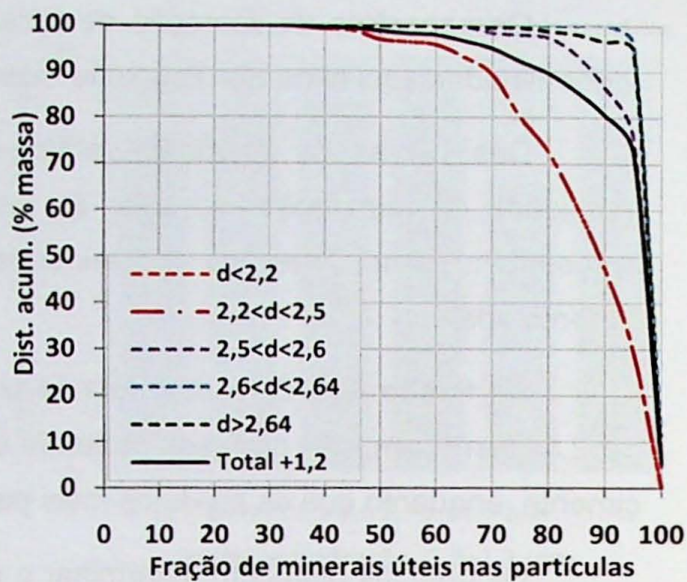
Das curvas de liberação verifica-se que esta aumenta nos produtos de maior densidade de separação, ou seja, as partículas concentradas nos produtos mais leves apresentam menor liberação dos minerais úteis e, portanto maior conteúdo de pasta de cimento aderida.

Na fração $-0,3+0,15$ mm nota-se um comportamento diferente nos produtos abaixo de $2,5 \text{ g/cm}^3$, em que as fases minerais encontram-se com maior proporção de pasta de cimento, enquanto que os produtos mais pesados tem menor proporção de pasta.

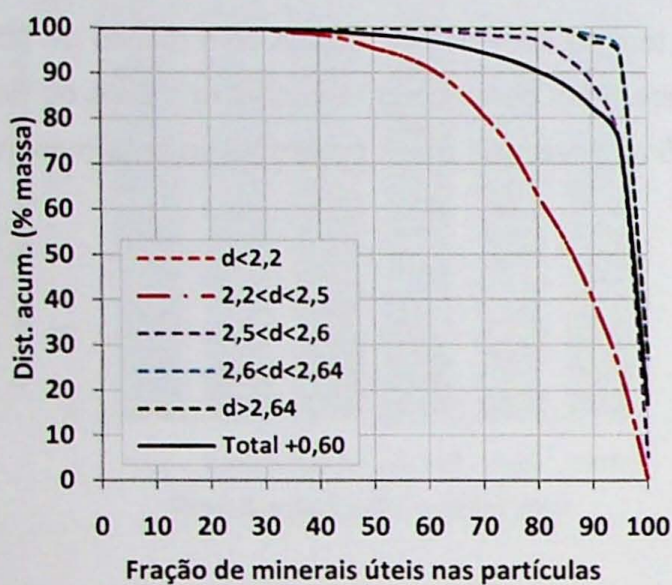
Os gráficos permitem determinar a proporção de partículas de minerais que ocorrem com frações de pasta de cimento variáveis de 0 a 100% na partícula. Exemplificando: nas três frações granulométricas caracterizadas tem-se 82% das partículas com menos de 10% de pasta de cimento; partículas totalmente liberadas da pasta correspondem a 24% do total de partículas analisadas da fração $-0,3+0,15$ mm, valores estes progressivamente menores nas frações mais grossas.



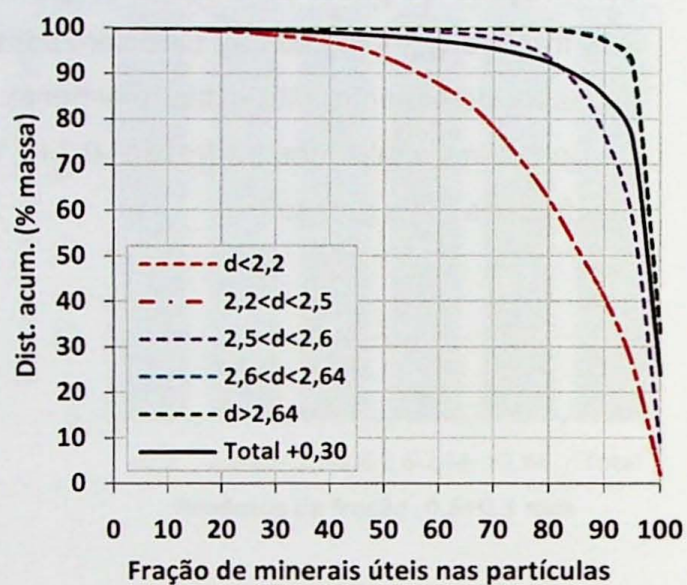
Fração -3,0+2,0 mm



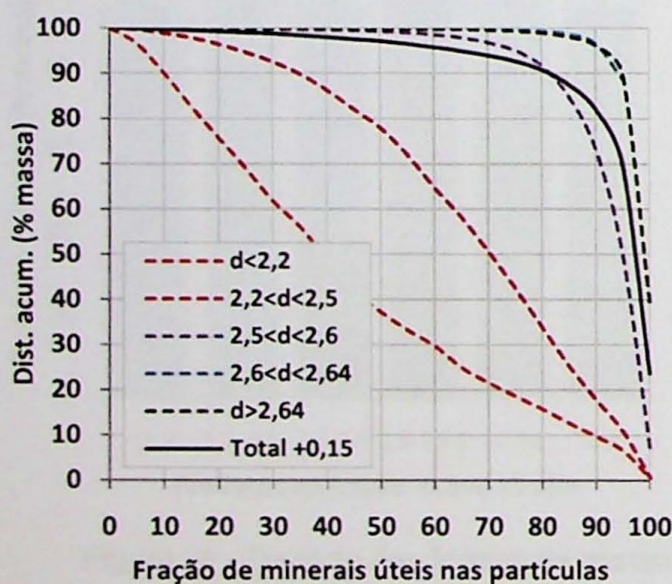
Fração -2,0+1,2 mm



Fração -1,2+0,6 mm



Fração -0,6+0,3 mm



Fração -0,3+0,15 mm

Liberação média em área para partículas isentas de pasta de cimento (dados do gráfico)

Minerais (% área)	Grau de liberação (%) por fração				
	+2	+1,2	+0,6	+0,3	+0,15
≥ 50	99	98	98	98	97
≥ 80	92	89	90	93	91
≥ 90	82	81	82	85	82
≥ 95	74	73	75	76	70
100	3,5	5,3	17	24	24

Frações em mm

Figura 16 - Espectros de liberação comparativos das fases minerais sem pasta de cimento

6 SUMÁRIO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição mediante cominuição por britador de impacto vertical em circuito fechado com peneira de abertura 3 mm apresenta uma distribuição granulométrica similar a do mesmo produto gerado pela usina de reciclagem da Urbem mediante britagem secundária em equipamento de mandíbulas. O peneiramento a úmido demonstrou que 13,3% em massa está retida em 2,0 mm, enquanto que a fração passante em 0,074 mm corresponde a 11,8% da massa amostra.

As separações em líquidos densos demonstram que uma elevada proporção das partículas presentes tem baixa porosidade, ou seja, grande quantidade de material está associado aos produtos de densidade de separação mais elevados, sendo 70% em média da massa afundado em 2,5 e cerca de 5-7% de material flutuado no ensaio a 2,2 g/cm³. Tais resultados encorajam o estudo do produto em questão.

As principais fases minerais presentes são tectosilicatos (principalmente quartzo, albita, ortoclásio), carbonatos (calcita, dolomita, anortita) e filossilicatos (muscovita, biotita e caulinita). As micas representam em média de 2 a 6% em massa e concentram-se nos produtos de maior densidade, especialmente em $d > 2,64$, assim como os carbonatos e os minerais máficos (piroxênio e anfibólio). Já a cerâmica concentra-se no produto entre 2,2 e 2,6 g/cm³. Outros minerais são representados por apatita, hematita, ilmenita, titanita e zircão, e por isso seus conteúdos são maiores nos mais pesados.

A determinação do teor de pasta de cimento por ataque ácido mostrou estreita correlação com a soma do teor de CaO determinado por FRX com a PF a 1.050°C ($R^2=0,99$). A quantificação desta fase por MEV-MLA apresentou uma correlação igualmente proficiente ($R^2=0,94$) com os resultados de ambos métodos anteriores. Esta correlação não é válida para o produto $d > 2,64$ g/cm³ devido a presença de carbonatos, os quais contribuem com os teores de CaO e são também solúveis em ácido clorídrico. Adicionalmente, ressalta-se que as estimativas do teor de pasta de cimento por CaO+PF ou por ataque ácido devem ser reconsideradas quando há carbonatos na amostra.

A separação por densidade permite a obtenção de produtos com reduzida quantidade de pasta de cimento e conteúdos de fases minerais (quartzo, feldspato, minerais máficos e outros) superiores a 90% (produtos $d > 2,5$).

Dos resultados das associações das fases presentes verificou-se que a pasta de cimento encontra-se majoritariamente mista em partículas binárias e ternárias,

especialmente com quartzo e feldspato, atingindo alguma liberação apenas nas frações mais finas.

Paralelamente, a análise da fase composta quartzo+feldspato indica um aumento na proporção de partículas livres nas frações mais finas (de 25 a 63%) e nos produtos de densidade crescente até 2,64. No produto $d > 2,64$ há uma grande proporção desta fase mista com micas e minerais máficos (maior liberação da pasta de cimento também demonstrada pelos espectros de liberação), enquanto que nos produtos com $d < 2,5$ ocorrem mistas com a pasta de cimento.

Dessa forma pode-se concluir que a caracterização microestrutural por MEV-MLA mostrou-se uma ferramenta valiosa nos estudos de separabilidade de agregados miúdos reciclados, com potencial comprovado para determinação dos teores de pasta de cimento, bem como na avaliação da liberação desta em relação às fases minerais de interesse.

As correlações estabelecidas e a coerência dos resultados apresentados demonstram a robustez e confiabilidade do procedimento estabelecido, de forma que pode ser utilizado como ferramenta de controle de qualidade na reciclagem de RCD na produção de agregados miúdos e na análise dos processos de produção adotados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ABNT NBR 9935 - Agregados - Terminologia. 2005.

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

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

Construction and demolition waste management in Brazil. Waste Management World. London 2003b. p. 54-57.

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

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

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

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

Brandão, P. R. G. *et al.* *Caracterização mineralógica e tecnológica*. Belo Horizonte, 2007. (Introdução ao tratamento de minérios).

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

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

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

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

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

- Cullity, B. D. *Elements of X-ray diffraction*. 2. ed. Reading, MA, 1978.
- 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* [S.I.], v. 23, n. 2, p. 872-877, 2009.
- DIN. DIN 4226-100: aggregates for mortar and concrete – part 100: recycled aggregates. Germany, 2002.
- Etzeberria, M. *et al.* Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research* [S.I.], v. 58, n. 10, p. 683-690, 2006.
- Fandrich, R. *et al.* Modern SEM-based mineral liberation analysis. *International Journal of Mineral Processing* [S.I.], v. 84, p. 310-320, 2007.
- 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. p. 1-43.
- Goldstein, J. *et al.* *Scanning electron microscopy and X-ray analysis*. 2. ed. New York: Plenum Press, 1992.
- Gonçalves, M. *et al.* Produção de areia de brita com qualidade. *Areia & Brita*. v. 10. São Paulo 2000. p. 20-25.
- Grim, R. E. *Clay mineralogy*. New York: McGraw-Hill, 1953.
- Gu, Y., 2003. *Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis*. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 2, 33-41.
- Gu, Y., Napier-Munn, T., 1997. *JK/Philips mineral liberation analyser – an introduction*. *Minerals Processing '97 Conf.* Cape Town, SA, p. 2.
- Hall, J.S., 1977. *Composite mineral particles – analyses by automated scanning electron microscopy*, PhD thesis, JKMRRC, The University of Queensland, Brisbane.
- Hendriks, C. F. *The building cycle*. Holanda: Aeneas, 2000.
- A new vision on the building cycle*. Holanda: Aeneas, 2004.
- Hobbs, G.; Hurley, J. Deconstruction and reuse of construction materials. In: CHINI, A. R. (Ed.). *CIB Publication 266*. Florida 2001. p. 98-124.
- John, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. (2000). 102 f. (Livre docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- Jungmann, A.; Quindt, J. - 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* [S.I.], p. 367-379, 1999.

- Kahn, H. *et al.* Image analysis coupled with a SEM-EDS applied to the characterization of a Zn-Pb partially weathered ore. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering* [S.I.], v. 1, p. 1-9, 2002.
- Limbachiya, M. C. *et al.* Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management* [S.I.], v. 27, n. 2, p. 201-208, 2007.
- Luz, A. B. *et al.* *Tratamento de Minérios*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004.
- Miller, J. D.; Lin, C. L. Three-dimensional analysis of particulates in mineral processing systems by cone beam X-ray microtomography. *Minerals & Metallurgical Processing* [S.I.], v. 21, n. 3, p. 113-124, 2004.
- Miranda, L. F. R. *Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe-A da construção civil*. (2005). 439 f. (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- Nagataki, S. *et al.* Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research* [S.I.], v. 34, n. 6, p. 965-971, 2004.
- Parfenoff, A. *et al.* *Les minéraux en grains; méthodes d'étude et détermination*. 6. ed. Paris: Dunod, 1970.
- Petruk, W. *Short Course on Image Analysis Applied to Mineral and Earth Sciences*. Ottawa: Mineral Association of Canada, 1989.
- Measurements of mineral liberation in connection with mineral beneficiation. *Process Mineralogy IX: The Minerals, Metals & Materials Society*, 1990. p. 31-36.
- Poon, C. S.; Chan, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources Conservation and Recycling* [S.I.], v. 50, n. 3, p. 293-305, 2007.
- 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. 102006. p. 1069-1078.
- Recommendation, R. Specification for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures* [S.I.], v. 27, p. 557-59, 1994.
- Russ, J. *The image processing handbook*. CRC, 2007.
- Sant'Agostinho, L. M.; Kahn, H. *Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais*. (1997). 29 f. (Boletim técnico) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- Silva, J. *et al.* Fine ceramics replacing cement in mortars Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars. *Materials and Structures* [S.I.], v. 41, n. 8, p. 1333-1344, 2008.
- Steen, B.; Borg, G. An estimation of the cost of sustainable production of metal concentrates from the earth's crust. *Ecological Economics* [S.I.], v. 42, n. 3, p. 401-413, 2002.

Sutherland, D. N.; Gottlieb, P. Application of Automated Quantitative Mineralogy in Mineral Processing. *Minerals Engineering* [S.l.], v. 4, p. 753-762, 1991.

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

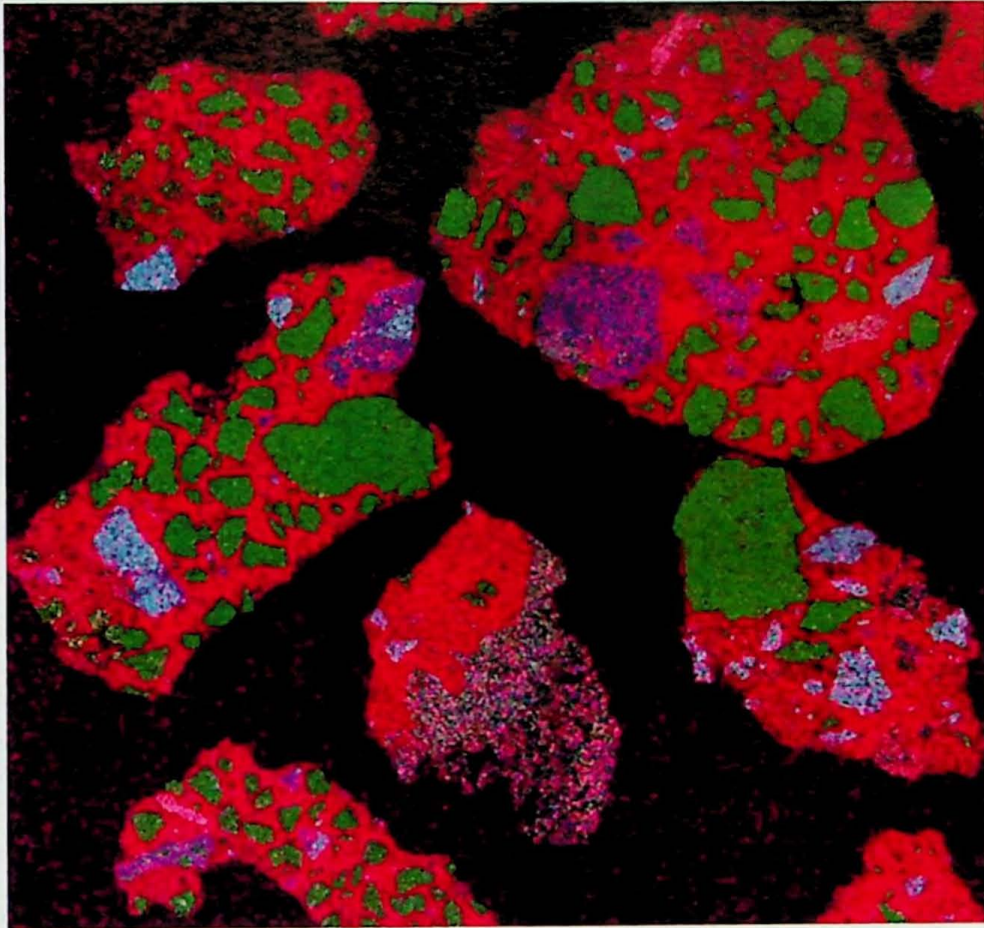
Ulsen, C. *et al.* Technological Characterization of Recycled Sand from C&D Waste (in press). *International RILEM*. São Paulo: RILEM, 2010.

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

APÊNDICE 1 - IMAGENS DE MAPEAMENTO DE RAIOS X

Imagens resultantes do mapeamento de raios X, em imagens de elétrons retroespalhados (tons de cinza), para cada elemento analisado (Si, Ca, Si, K, Na, Fe, Al, Mg) e a imagem composta (mixed).

Exemplo 1 - Fração -3,0+2,0 mm



■ Ca ■ Si ■ K ■ Na ■ Fe ■ Al

Figura 1 – Detalhe da imagem mapeada composta (mixed)

APÊNDICE 1 - IMAGENS DE MAPEAMENTO DE RAIOS X

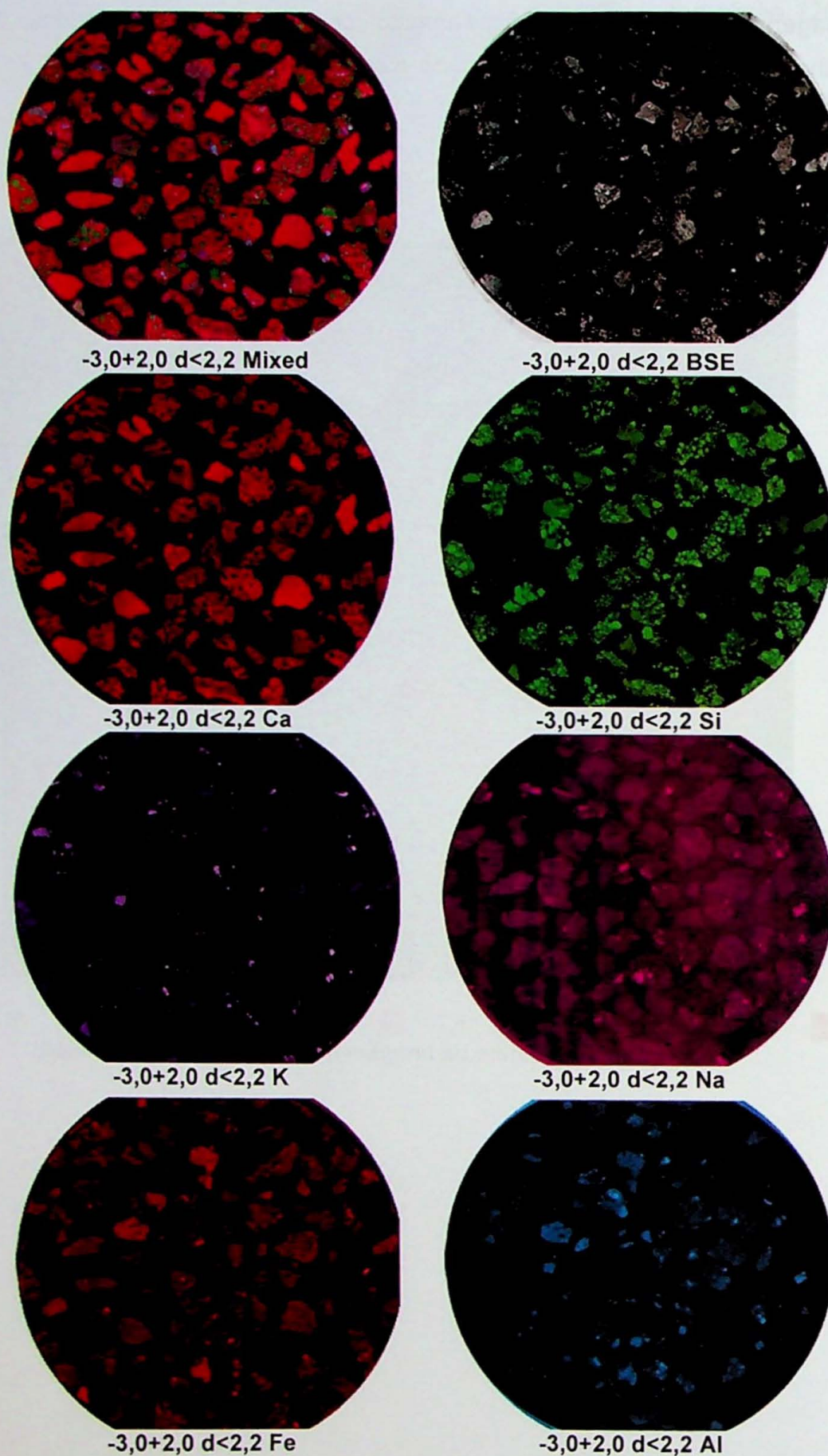


Figura 18 – Mapeamento da seção por elemento químico de interesse

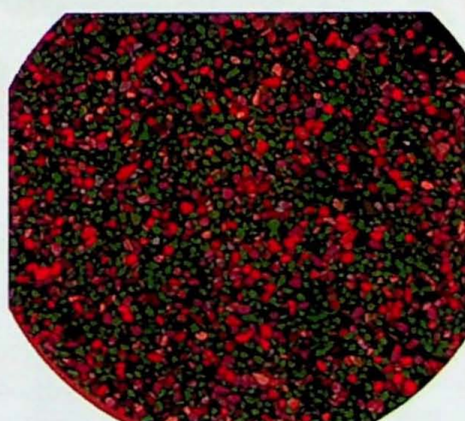
APÊNDICE 1 - IMAGENS DE MAPEAMENTO DE RAIOS X

Exemplo 2 - Fração -0,60+0,30 mm

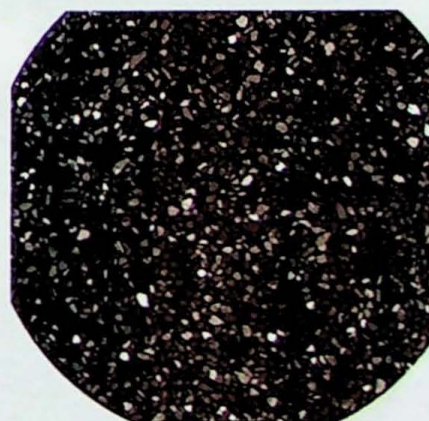


■ Ca ■ Si ■ K ■ Mg ■ Na ■ Fe ■ Al

Figura 19 - Detalhe da imagem mapeada composta (mixed)



-0,6+0,3 d>2,64 Mixed



-0,6+0,3 d>2,64 BSE

APÊNDICE 1 - IMAGENS DE MAPEAMENTO DE RAIOS X

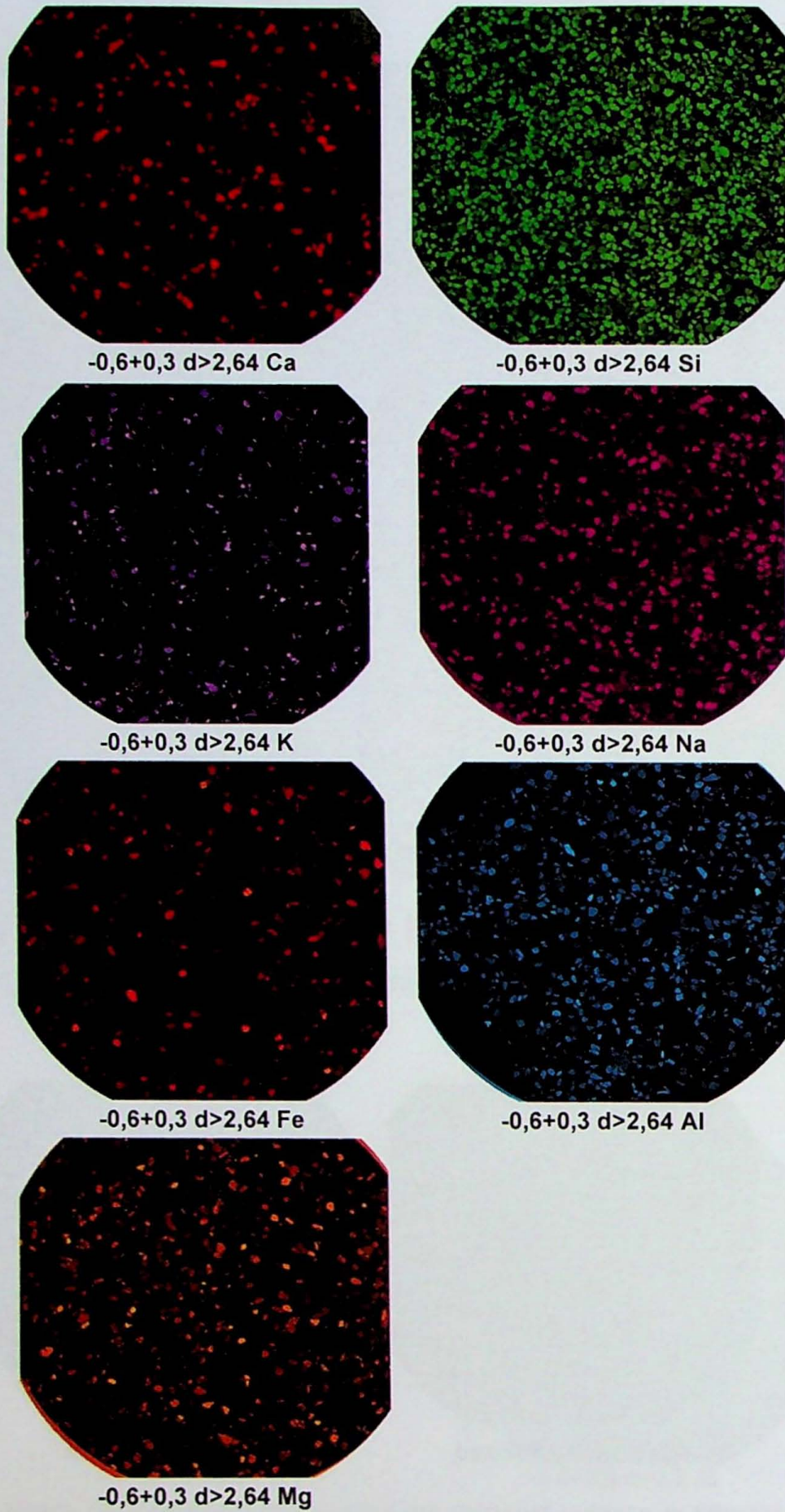
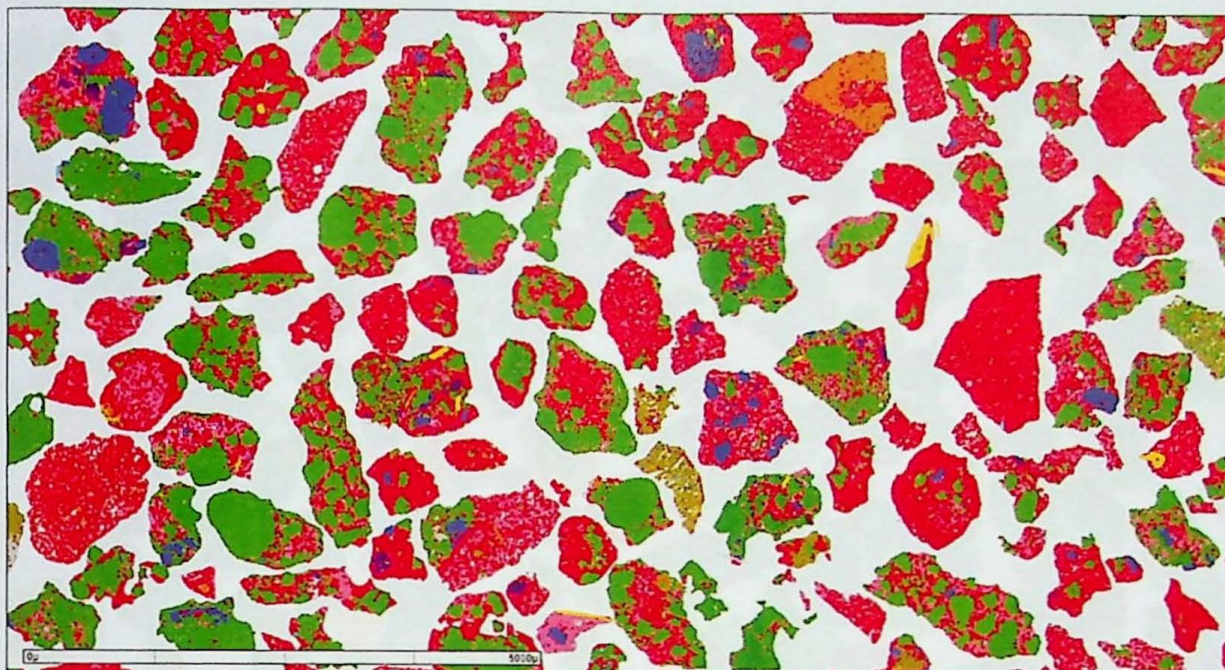


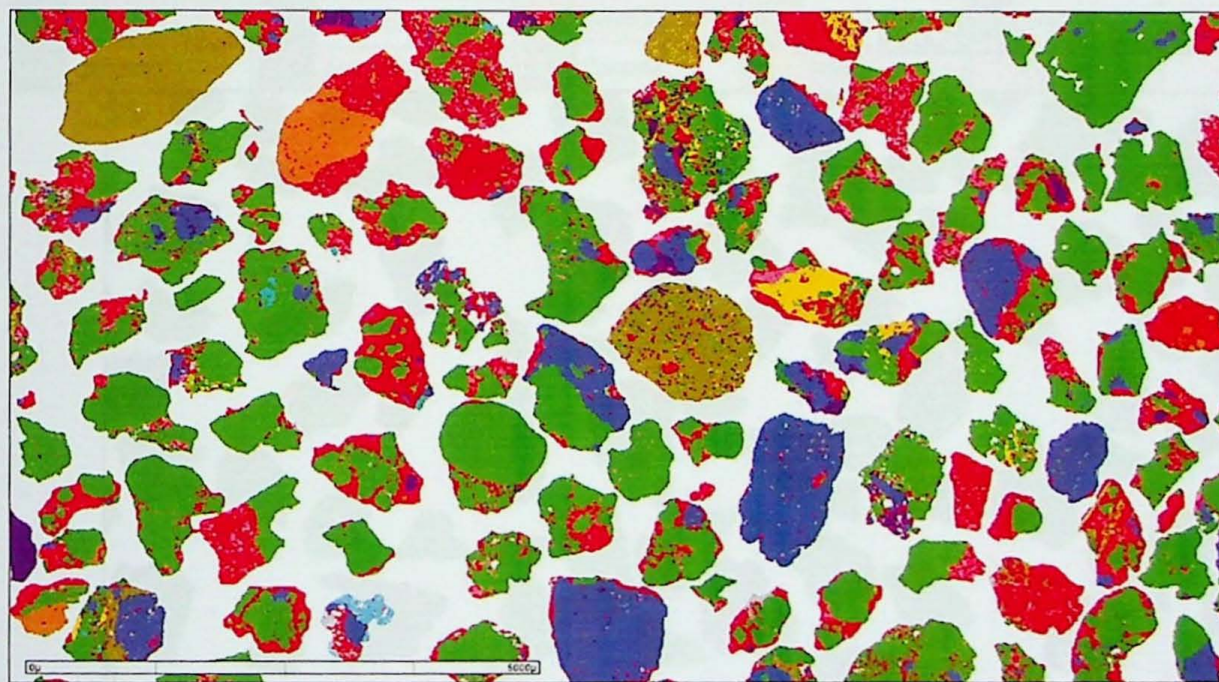
Figura 20 – Mapeamento da seção por elemento químico de interesse

APÊNDICE 2 - IMAGENS DIGITAIS MEV-MLA

Fração -1,2+0,6 mm d<2,2



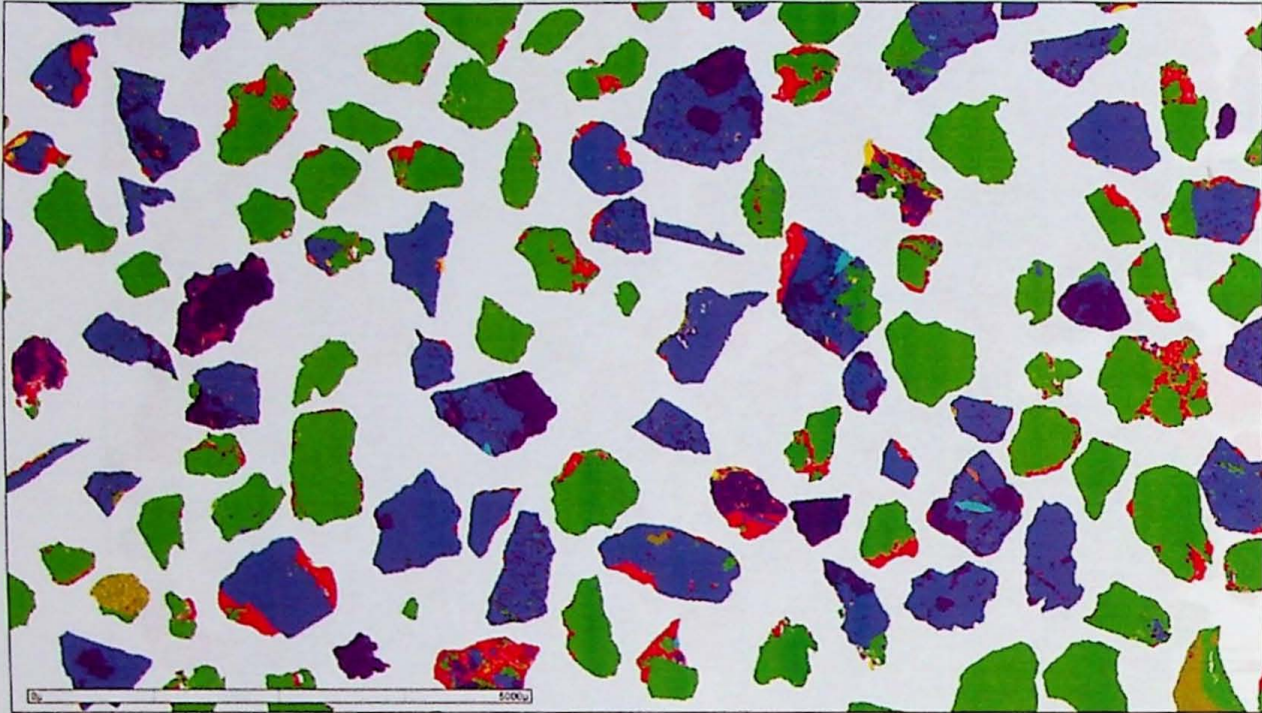
Fração -1,2+0,6 mm 2,2<d<2,5



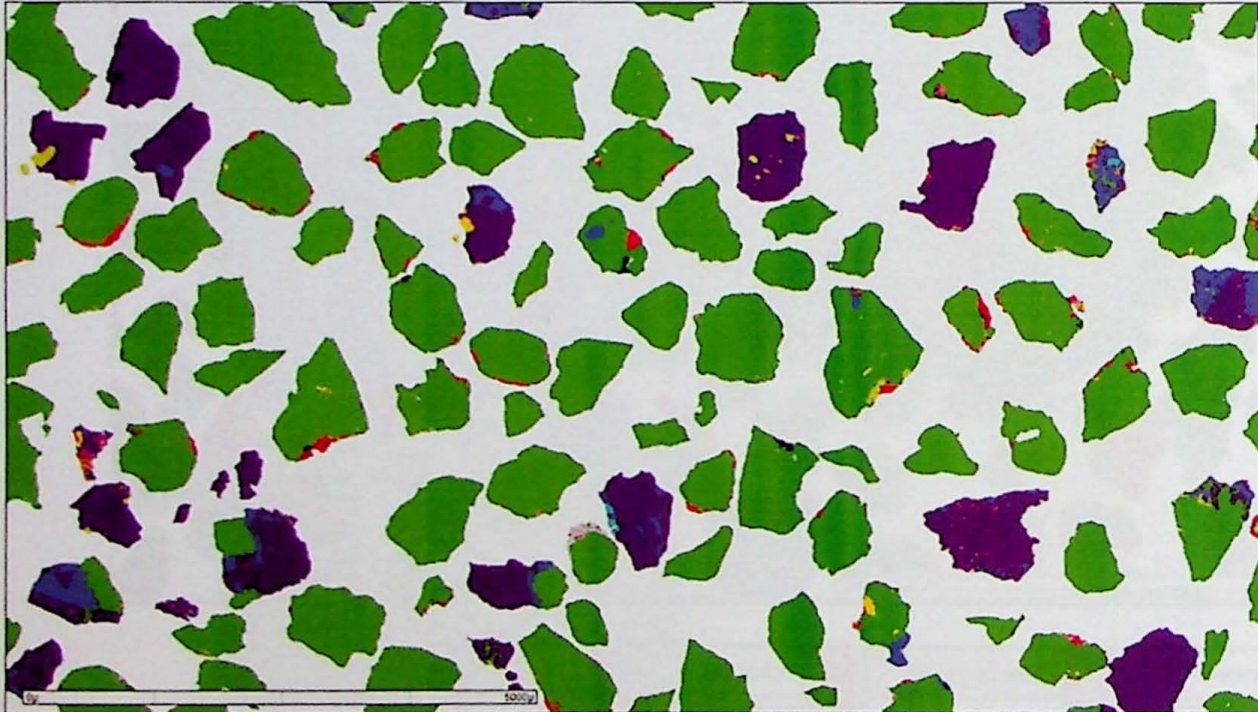
Titanite	cement_paste	Dolomite	Ca_Si	Hematite
ilmenite	Orthoclase	Calcite	Muscovite	Apatite
Quartz	Albite	Ceramic	Biotite	

APÊNDICE 1 - IMAGENS DE MAPEAMENTO DE RAIOS X

Fração -1,2+0,6 mm 2,5<d<2,6



Fração -1,2+0,6 mm 2,6<d<2,64



Titanite	cement_paste	Dolomite	Ca_Si	Hematite
ilmenite	Orthoclase	Calcite	Muscovite	Apatite
Quartz	Albite	Ceramic	Biotite	

APÊNDICE 2 - IMAGENS DIGITAIS MEV-MLA

Fração -1,2+0,6 mm d>2,64



Titanite	cement_paste	Dolomite	Ca_Si	
ilmenite	Orthoclase	Calcite	Muscovite	Hematite
Quartz	Albite	Ceramic	Biotite	Apatite

APÊNDICE 3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO EM LÍQUIDO DENSO

Fração -3,0+2,0 mm - Composição mineralógica dos produto

Mineral	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	Total
Albite	1,79	4,57	14,9	27,0	34,3	21,0
Apatite	0,03	0,04	0,18	0,28	0,43	0,25
Biotite	1,07	0,78	1,83	5,48	10,1	5,33
Ca_Si	4,97	3,22	0,83	0,09	0,05	1,25
CaAl_Fe	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcite	1,90	1,51	2,35	3,08	5,21	3,38
cement_paste	24,6	13,0	7,25	1,80	1,11	6,54
Ceramic	3,88	4,32	14,4	0,99	2,11	4,70
Dolomite	0,78	3,31	1,99	0,06	2,60	2,25
Hematite	0,18	0,11	0,11	0,23	0,52	0,30
ilmenite	0,06	0,14	0,04	0,09	0,43	0,23
Muscovite	0,08	0,05	0,20	0,58	1,38	0,68
Orthoclase	3,90	16,9	28,5	15,1	9,77	14,9
Pirox_Anfib	0,00	0,00	0,27	1,75	8,81	3,85
Quartz	56,7	52,0	27,0	43,1	22,6	35,0
serpentina	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Titanite	0,05	0,09	0,09	0,33	0,64	0,34
Zircon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fração -2,0+1,2 mm - Composição mineralógica dos produto

Mineral	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	Total
Albite	2,14	3,16	12,0	17,5	24,1	13,8
Anatasio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Apatite	0,04	0,03	0,04	0,06	0,37	0,14
Biotite	1,03	0,88	0,96	1,27	9,69	3,54
Ca_Si	11,7	3,23	0,70	0,14	0,15	1,80
CaAl_Fe	1,60	0,80	0,17	0,02	0,00	0,35
Calcite	2,30	1,42	0,79	0,18	5,49	2,29
cement_paste	25,9	13,6	3,66	1,45	1,56	6,56
Ceramic	3,57	4,05	9,74	2,34	1,99	4,13
Dolomite	0,97	1,46	0,22	0,00	5,18	1,98
Hematite	0,15	0,08	0,16	0,16	1,38	0,49
ilmenite	0,07	0,04	0,02	0,02	0,22	0,09
Muscovite	0,09	0,07	0,13	1,06	2,50	0,99
Orthoclase	3,94	13,6	31,4	13,1	9,43	15,0
Pirox_Anfib	0,00	0,01	1,08	1,06	5,21	1,93
Quartz	46,3	57,4	38,8	61,6	32,0	46,7
serpentina	0,03	0,09	0,11	0,01	0,01	0,05
Titanite	0,08	0,08	0,06	0,07	0,75	0,27
Zircon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

APÊNDICE 3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO EM LÍQUIDO DENSO

Fração -1,2+0,6 mm – Composição mineralógica dos produto

Mineral	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	Total
Albite	1,88	3,05	10,6	10,7	20,0	10,9
Anatasio	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Apatite	0,04	0,03	0,02	0,02	0,26	0,08
Biotite	0,76	1,04	0,56	0,56	8,58	2,68
Ca_Si	15,9	3,93	0,46	0,12	0,11	1,82
CaAl_Fe	1,55	0,67	0,10	0,02	0,01	0,25
Calcite	1,58	1,76	0,63	0,20	5,69	2,07
cement_paste	33,4	17,7	4,17	1,06	1,26	7,00
Ceramic	3,56	6,69	4,12	0,82	2,76	3,39
Dolomite	0,97	0,76	0,19	0,13	2,99	1,04
Hematite	0,12	0,64	0,05	0,03	0,93	0,40
ilmenite	0,07	0,10	0,02	0,01	0,23	0,09
Muscovite	0,05	0,18	0,08	0,10	1,01	0,34
Orthoclase	3,59	15,9	24,5	6,31	5,05	11,6
Pirox_Anfib	0,00	0,00	0,00	0,55	6,60	1,80
Quartz	36,3	47,4	54,4	79,3	43,5	56,2
serpentina	0,13	0,15	0,04	0,01	0,02	0,05
Titanite	0,11	0,05	0,08	0,04	1,02	0,30
Zircon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fração -0,6+0,3 mm - Composição mineralógica dos produto

Mineral	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	Total
Albite	1,88	3,11	7,05	5,54	14,8	6,82
Anatasio	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Apatite	0,04	0,03	0,02	0,01	0,35	0,07
Biotite	0,68	0,85	0,49	0,23	7,47	1,62
Ca_Si	21,3	4,14	0,79	0,18	0,21	1,92
CaAl_Fe	2,46	0,66	0,10	0,02	0,01	0,25
Calcite	1,42	1,44	0,74	0,15	6,78	1,64
cement_paste	47,4	21,8	6,80	1,63	1,55	7,88
Ceramic	3,27	3,38	3,83	1,34	2,83	2,44
Dolomite	0,37	0,80	0,21	0,08	2,94	0,71
Hematite	0,14	0,18	0,05	0,02	1,97	0,39
ilmenite	0,08	0,09	0,02	0,01	0,82	0,16
Muscovite	0,12	0,75	0,15	0,10	2,76	0,66
Orthoclase	3,75	13,7	30,0	2,10	2,15	8,91
Pirox_Anfib	0,41	0,75	0,67	0,50	9,19	2,03
Quartz	16,4	48,1	48,9	88,0	45,0	64,2
serpentina	0,15	0,21	0,04	0,03	0,04	0,07
Titanite	0,09	0,05	0,07	0,01	1,11	0,22
Zircon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

APÊNDICE 3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO EM LÍQUIDO DENSO

Fração -0,3+0,15 mm - Composição mineralógica dos produto

Mineral	d<2,2	2,2<d<2,5	2,5<d<2,6	2,6<d<2,64	d>2,64	Total
Albite	1,52	2,97	6,41	6,22	10,1	6,25
Apatite	0,05	0,05	0,02	0,01	0,28	0,07
Biotite	0,67	1,13	0,61	0,23	7,13	1,72
Ca_Si	20,1	5,52	0,63	0,09	0,15	2,31
CaAl_Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Calcite	1,71	2,33	0,82	0,41	5,47	1,76
cement_paste	60,6	43,7	9,01	2,06	1,93	13,1
Ceramic	2,65	5,66	3,23	0,99	3,30	2,73
Dolomite	0,60	1,23	0,30	0,04	2,67	0,77
Hematite	0,11	0,18	0,06	0,04	2,99	0,60
ilmenite	0,06	0,17	0,03	0,02	1,79	0,36
Muscovite	0,07	0,58	0,11	0,15	2,27	0,56
Orthoclase	2,38	11,0	19,7	1,74	1,13	8,00
Pirox_Anfib	0,00	0,00	0,04	0,94	7,68	1,71
Quartz	9,39	25,3	59,0	87,0	51,4	59,6
serpentina	0,00	0,00	0,00	0,03	0,22	0,05
Titanite	0,06	0,12	0,03	0,02	1,52	0,31
Zircon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Fração -3,0+2,0 mm

Associações da pasta de cimento 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	3,86	0,15	0,19	0,02		1,01
Mista em binária	50,8	20,1	29,2	35,1	5,81	28,5
quartzo	0,90	0,48	6,08	6,97	0,98	1,79
feldspatos						
micas		0,04	8,16		0,14	1,46
carbonatos	22,6	5,49	5,16	24,2	3,99	9,88
cerâmica	0,36		0,26			0,13
pirox-anfibólio					0,06	
outros	27,0	14,1	9,52	3,97	0,64	15,2
Mista em ternária	45,3	79,7	70,6	64,8	94,2	70,5
quartzo	8,23	16,4	22,7	27,5	41,9	17,5
feldspatos		0,27		0,08	0,65	0,18
micas	0,24	0,78	2,97	7,37	7,53	1,64
carbonatos	0,69	6,99	9,35		18,5	6,43
cerâmica	3,57	1,25	4,69	0,01	1,38	2,37
pirox-anfibólio			3,21	1,04	9,52	1,18
outros	32,6	54,0	27,7	28,8	14,7	41,2

Associações dos feldspatos 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	0,48	13,2	38,3	13,9	5,16	14,3
Mista em binária	3,26	33,9	37,9	30,2	27,8	30,8
quartzo	2,51	29,6	18,8	16,1	5,02	12,9
micas			12,7	8,80	11,2	9,43
carbonatos						
pasta de cimento	0,74	4,28	2,03			1,04
cerâmica			0,07		3,11	1,57
pirox-anfibólio			4,43	5,32	6,00	4,66
outros					2,46	1,23
Mista em ternária	96,3	52,9	23,7	55,9	67,1	54,9
quartzo	62,4	36,6	14,1	37,0	19,2	23,6
micas	0,74	2,07	2,79	15,1	23,7	14,8
carbonatos	0,04	0,05	0,28	0,07	0,70	0,42
pasta de cimento	29,1	12,5	5,83	0,90	0,97	3,88
cerâmica	4,03	0,89	0,27	0,10	4,14	2,31
pirox-anfibólio				2,57	12,8	6,77
outros		0,83	0,50	0,14	5,60	3,04

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Associações do quartzo 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	4,21	2,50	23,2	28,9	31,3	16,9
Mista em binária	48,3	38,5	37,2	21,9	24,2	33,1
feldspatos		22,8	20,2	20,2	16,9	18,3
micas				1,55	5,29	1,62
carbonatos		0,01		0,02	1,96	0,52
pasta de cimento	46,3	15,3	15,6			12,2
cerâmica	2,04	0,35	1,33			0,50
pirox_anfib						
outros				0,06		0,01
Mista em ternária	47,5	59,0	39,6	49,2	44,6	50,1
feldspatos	14,2	23,1	18,2	34,0	25,1	23,7
micas	0,16	0,36	4,41	12,6	10,8	5,43
carbonatos	2,03	4,60	1,87	0,20	0,46	2,24
pasta de cimento	29,7	29,8	13,6	0,93	0,18	15,6
cerâmica	1,48	0,85	0,93		0,98	0,83
pirox_anfib				0,96	6,86	1,95
outros		0,29	0,59	0,61	0,21	0,33

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

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Fração -2,0+1,2 mm

Associações da pasta de cimento 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	5,73	1,59		32,2	0,01	3,77
Mista em binária	45,5	39,6	48,8	36,2	10,2	40,5
quartzo	1,10	2,92	12,5	4,12	3,16	3,36
feldspatos						
micas		0,02			0,03	0,01
carbonatos	9,61	3,46	8,66		6,24	5,85
cerâmica	0,02	0,05	0,11	0,60	0,11	0,07
pirox-anfibólio			0,05			0,01
outros	34,8	33,1	27,5	31,4	0,65	31,2
Mista em ternária	48,7	58,9	51,2	31,7	89,8	55,8
quartzo	10,1	15,1	20,3	13,4	11,8	13,9
feldspatos		0,21	0,26	0,07	0,40	0,16
micas	0,36	0,67	0,64	1,14	6,00	0,89
carbonatos	2,00	2,72	4,06	0,06	42,0	4,78
cerâmica	1,42	2,40	0,50	0,15	0,38	1,72
pirox-anfibólio			0,44	0,57	10,2	0,64
outros	34,8	37,7	25,0	16,3	19,0	33,7

Associações dos feldspatos 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	0,00	5,45	43,9	23,5	3,43	19,5
Mista em binária	8,35	32,6	37,4	55,8	33,3	38,9
quartzo	0,40	9,56	23,3	38,4	15,3	21,6
micas		0,02	4,19	10,2	11,1	7,18
carbonatos					4,01	1,36
pasta de cimento	7,68	19,5	7,55		1,01	5,43
cerâmica	0,26	3,53	1,47	0,02		0,94
pirox_anfib			0,89	2,73	1,84	1,47
outros				4,36	0,01	0,96
Mista em ternária	91,6	61,9	18,7	20,8	63,3	41,6
quartzo	45,9	34,7	8,81	9,54	29,6	20,3
micas	0,42	0,52	1,49	6,87	22,0	9,44
carbonatos	0,25	0,78	0,00	0,01	0,32	0,23
pasta de cimento	42,9	21,5	5,98	1,26	0,27	5,80
cerâmica	2,12	4,36	0,50	0,84	0,85	1,28
pirox_anfib	0,00	0,00	1,54	1,07	5,59	2,56
outros	0,00	0,06	0,39	1,19	4,70	1,97

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Associações do quartzo 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	0,91	13,4	35,8	71,7	25,5	34,3
Mista em binária	48,1	41,4	40,2	19,6	24,7	32,4
feldspatos		6,67	20,4	12,3	14,1	11,4
micas					4,54	0,90
carbonatos		1,03		0,52	4,10	1,27
pasta de cimento				0,49	2,00	0,53
cerâmica	48,0	33,5	18,0	5,01		17,7
pirox_anfib	0,06	0,10	0,49			0,11
outros			1,31	1,26		0,55
Mista em ternária	51,0	45,3	24,0	8,75	49,8	33,3
feldspatos	10,1	17,0	10,0	6,00	26,8	14,4
micas		0,13	1,89	0,01	1,46	0,63
carbonatos	1,12	0,41	0,71	0,78	13,4	3,19
pasta de cimento	2,24	1,99	0,94		2,68	1,44
cerâmica	35,4	24,5	6,13	1,28	1,77	11,5
pirox_anfib	2,25	1,29	1,51		0,21	0,82
outros			2,82	0,67	3,40	1,30

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

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Fração -1,2+0,6 mm

Associações da pasta de cimento 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	11,5	1,81	0,95	0,06	12,3	4,77
Mista em binária	52,1	48,1	56,6	72,6	24,0	50,1
quartzo	39,5	37,3	41,1	67,1	6,20	38,3
feldspatos	2,67	3,88	11,3	4,97	4,59	4,38
micas	0,17		0,41		0,21	0,10
carbonatos	8,07	6,35	2,88	0,31	12,1	6,47
cerâmica	1,02	0,51	1,02		0,01	0,67
pirox-anfibólio				0,15	0,72	0,03
outros	0,65	0,02			0,20	0,20
Mista em ternária	36,4	50,1	42,4	27,4	63,7	45,1
quartzo	22,8	28,9	24,5	14,3	12,7	25,5
feldspatos	9,26	15,2	12,4	8,71	11,4	12,9
micas	0,66	1,72	0,94	1,11	7,01	1,52
carbonatos	2,06	1,97	2,44	2,45	19,4	2,73
cerâmica	1,45	2,14	1,85	0,12	0,54	1,78
pirox-anfibólio				0,63	9,02	0,37
outros	0,21	0,15	0,24	0,03	3,61	0,31

Associações dos feldspatos 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		9,10	57,4	52,4	19,1	36,0
Mista em binária	14,9	37,0	31,9	36,9	42,6	36,7
quartzo	1,32	5,08	18,4	18,6	11,3	13,8
micas	0,30		0,20	9,59	20,7	7,86
carbonatos		1,98	0,51		0,21	0,58
pasta de cimento	13,2	29,9	9,81	2,88	2,07	9,95
cerâmica	0,05	0,08	1,12	2,88	0,05	0,99
pirox_anfib				1,53	5,06	1,73
outros			1,90	1,41	3,18	1,78
Mista em ternária	85,1	53,9	10,7	10,8	38,3	27,3
quartzo	34,2	27,2	5,02	5,28	9,35	10,8
micas	0,27	0,48	0,54	2,39	13,8	4,61
carbonatos	0,44	0,32	0,03	0,22	1,50	0,54
pasta de cimento	47,7	24,5	3,99	1,04	1,64	7,05
cerâmica	2,41	1,22	1,07	0,36	2,01	1,22
pirox_anfib				1,36	6,76	2,17
outros	0,12	0,13	0,07	0,13	3,26	0,98

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Associações do quartzo 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	2,16	7,72	52,0	80,0	71,7	57,0
Mista em binária	60,5	55,4	35,3	17,2	13,8	28,5
feldspatos	2,18	2,86	9,34	6,76	6,75	6,38
micas				0,52	4,37	1,05
carbonatos	0,11			0,17	0,09	0,09
pasta de cimento	58,0	52,1	24,8	7,17	0,75	19,3
cerâmica	0,14	0,50	0,91	1,32	0,35	0,86
pirox_anfib				1,28	0,91	0,68
outros			0,32		0,53	0,16
Mista em ternária	37,4	36,9	12,7	2,81	14,6	14,4
feldspatos	7,25	11,4	3,77	1,58	4,65	4,61
micas	0,50	1,25	0,16	0,23	4,84	1,31
carbonatos	1,33	1,89	1,04	0,05	1,21	0,85
pasta de cimento	27,4	19,8	5,99	0,66	0,68	6,10
cerâmica	0,79	2,08	1,73	0,09	0,42	0,86
pirox_anfib				0,17	1,63	0,38
outros	0,13	0,45	0,03	0,03	1,13	0,32

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

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Fração -0,6+0,3mm

Associações da pasta de cimento 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	17,0	5,15	0,73	2,42	7,29	8,43
Mista em binária	56,9	56,5	75,8	86,2	38,0	61,1
quartzo	33,0	38,3	54,3	83,1	9,38	41,5
feldspatos	12,8	10,9	18,1	1,63	3,11	11,5
micas	0,48	0,40	0,15	0,14	2,76	0,44
carbonatos	6,91	5,45	2,12	1,03	13,0	5,36
cerâmica	2,88	0,91	1,18	0,05	0,25	1,53
pirox-anfibólio	0,19	0,41	0,01	0,25	5,43	0,42
outros	0,67	0,18	0,01		4,04	0,42
Mista em ternária	26,1	38,3	23,5	11,4	54,8	30,4
quartzo	12,6	19,4	11,5	7,01	8,20	14,7
feldspatos	7,94	11,0	7,88	2,00	13,0	8,87
micas	0,75	1,72	0,68	0,34	7,43	1,31
carbonatos	1,77	2,99	1,80	0,17	11,8	2,45
cerâmica	2,30	1,92	0,97	0,50	1,72	1,80
pirox-anfibólio	0,16	0,54	0,37	1,31	10,0	0,73
outros	0,55	0,74	0,23	0,04	2,60	0,61

Associações dos feldspatos 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	0,07	7,15	45,8	55,9	23,2	36,7
Mista em binária	44,1	49,6	42,5	33,3	37,6	40,8
quartzo	0,09	2,44	8,76	17,3	6,35	8,98
micas		0,60	0,66	7,45	17,1	5,13
carbonatos			0,03		0,48	0,10
pasta de cimento	43,6	45,4	29,0	2,04	2,79	21,3
cerâmica	0,37	0,98	2,53	2,99	1,69	2,18
pirox_anfib		0,22	0,93	2,69	6,19	2,14
outros			0,56	0,87	2,99	0,97
Mista em ternária	55,9	43,3	11,7	10,9	39,1	22,5
quartzo	10,6	16,5	4,55	3,22	6,55	6,71
micas	0,44	0,86	0,63	2,74	12,5	3,29
carbonatos	0,66	0,97	0,32		1,71	0,62
pasta de cimento	41,5	21,6	4,64	1,06	1,91	6,80
cerâmica	2,18	2,16	0,99	1,62	2,15	1,55
pirox_anfib	0,13	0,69	0,38	1,90	11,5	2,79
outros	0,33	0,53	0,23	0,32	2,87	0,78

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Associações do quartzo 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	1,29	18,1	34,1	79,7	79,5	65,4
Mista em binária	68,4	59,1	57,0	18,7	12,7	28,4
feldspatos		2,79	4,13	2,19	2,07	2,48
micas		0,35	0,34	0,30	3,93	0,74
carbonatos		0,41	0,33	0,08	0,41	0,19
pasta de cimento	68,0	54,4	51,0	13,4	1,59	22,5
cerâmica	0,05	0,47	0,95	1,51	1,10	1,25
pirox_anfib	0,32	0,17	0,15	1,07	1,35	0,87
outros		0,53	0,06	0,11	2,23	0,40
Mista em ternária	30,4	22,8	8,93	1,60	7,83	6,15
feldspatos	3,73	6,83	3,38	0,45	2,40	1,86
micas	0,51	0,88	0,22	0,09	1,90	0,42
carbonatos	0,58	0,99	0,65	0,07	0,83	0,35
pasta de cimento	24,1	12,7	3,74	0,58	0,39	2,69
cerâmica	1,15	0,88	0,56	0,09	0,45	0,30
pirox_anfib	0,12	0,11	0,16	0,31	1,32	0,39
outros	0,15	0,35	0,22	0,01	0,53	0,14

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

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

Fração -0,3+0,15 mm

Associações da pasta de cimento 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	36,6	12,3	3,38	1,31	1,78	18,8
Mista em binária	50,8	59,3	67,0	76,7	46,5	58,1
quartzo	20,3	30,4	48,6	68,8	14,8	31,4
feldspatos	12,9	12,5	13,9	4,33	1,77	12,3
micas	1,42	1,37	0,23	0,05	3,91	1,18
carbonatos	11,5	11,6	2,56	1,51	10,5	9,41
cerâmica	3,89	2,76	1,56	0,09	1,08	2,79
pirox-anfibólio				1,84	5,35	0,22
outros	0,83	0,66	0,14	0,09	9,05	0,81
Mista em ternária	12,7	28,5	29,6	22,0	51,7	23,2
quartzo	4,20	10,9	14,7	13,2	9,66	9,20
feldspatos	4,03	7,56	9,01	3,39	6,98	6,32
micas	0,82	1,74	0,72	0,89	8,20	1,33
carbonatos	1,59	4,32	2,27	1,18	8,39	2,90
cerâmica	1,79	3,37	2,54	0,83	2,57	2,50
pirox-anfibólio			0,09	2,19	10,4	0,37
outros	0,22	0,62	0,32	0,33	5,54	0,52

Associações dos feldspatos 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	0,30	4,38	37,3	55,0	37,5	36,1
Mista em binária	19,1	52,2	43,1	34,9	32,1	40,6
quartzo	0,11	0,58	12,8	13,7	5,81	10,3
micas		0,18	0,94	3,64	11,3	2,81
carbonatos		0,03	0,84	2,27	1,28	1,06
pasta de cimento	59,2	64,0	26,5	7,18	2,67	24,5
cerâmica	0,38	0,34	2,54	1,71	1,12	1,88
pirox_anfib				5,17	7,15	1,99
outros			0,37	1,06	2,07	0,69
Mista em ternária	80,6	43,5	19,6	10,1	30,4	23,3
quartzo	5,13	5,95	10,7	2,66	5,31	7,75
micas	0,66	0,51	0,53	2,39	8,57	2,02
carbonatos	0,85	1,59	0,47	0,16	2,14	0,79
pasta de cimento	30,4	19,9	5,59	2,40	2,08	6,65
cerâmica	2,79	2,42	1,31	1,19	2,36	1,59
pirox_anfib				1,41	9,21	1,57
outros	0,15	0,13	0,02	0,09	1,41	0,25

APÊNDICE 4 - DETALHES DAS ASSOCIAÇÕES DAS PARTÍCULAS MISTAS

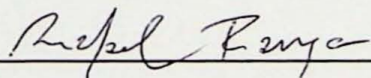
Associações do quartzo em partículas mistas (-0,3+0,15 mm)

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	3,93	3,92	34,1	77,5	77,6	60,5
Mista em binária	22,7	50,4	51,6	20,2	15,7	30,1
feldspatos	0,29	0,14	4,72	2,20	1,86	2,74
micas	0,02	0,03	0,27	0,37	2,80	0,70
carbonatos	0,18	0,05	0,53	0,12	1,42	0,44
pasta de cimento	77,1	74,2	45,8	13,0	4,19	24,9
cerâmica	0,04	1,52	1,67	1,83	1,34	1,67
pirox_anfib				2,56	2,33	1,63
outros		0,02	0,10	0,18	1,83	0,40
Mista em ternária	73,3	45,7	14,3	2,30	6,65	9,41
feldspatos	1,79	2,88	5,41	0,24	1,42	2,06
micas	0,25	0,40	0,33	0,09	1,48	0,39
carbonatos	0,60	0,92	0,71	0,09	0,58	0,39
pasta de cimento	14,6	13,9	4,85	0,88	0,70	2,81
cerâmica	1,05	1,88	1,44	0,37	0,45	0,77
pirox_anfib			0,04	0,49	1,28	0,46
outros	0,14	0,12	0,05	0,03	0,71	0,15

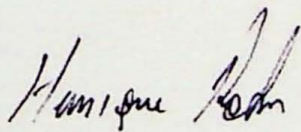
Associações do quartzo + feldspato em partículas mistas (-0,3+0,15 mm)

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

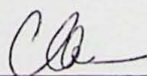
De acordo,



Rafael Ribeiro de França (discente)



Prof. Dr. Henrique Kahn (orientador - Poli-USP)



Carina Ulsen, Msc. (co-orientadora - Poli-USP)

