TOMAZ TEODORO DA CRUZ

CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE AREIA DA BACIA SEDIMENTAR DE TAUBATÉ PARA A FABRICAÇÃO DE VIDROS

São Paulo
2011

TOMAZ TEODORO DA CRUZ

CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE AREIA DA BACIA SEDIMENTAR DE TAUBATÉ PARA A FABRICAÇÃO DE VIDROS

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

São Paulo
2011

TOMAZ TEODORO DA CRUZ

CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE AREIA DA BACIA SEDIMENTAR DE TAUBATÉ PARA A FABRICAÇÃO DE VIDROS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

São Paulo
2011

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

São Paulo, 26 de abril de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Cruz, Tomaz Teodoro da
Caracterização de depósitos de areia da bacia sedimentar de Taubaté para a fabricação de vidros / T.T. da Cruz. -- ed. rev. --- São Paulo, 2011.
104 p.

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

1. Caracterização Tecnológica de Minérios 2. Areia (Aplicação) 3. Vidro (Fabricação) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às companheiras de todas as viagens, Paula e Marli, pelo apoio ao longo destes anos

AGRADECIMENTOS

Muitos contribuíram para a execução deste trabalho e agradeço especialmente:

Aos amigos mineradores, Claudênio J. Lourenço, André Matarazzo, Antônio Villas Boas, Mário, Roberto e Nelson Aoki, Clovis Moscoso e Beto Casanovas, que abriram suas empresas que serviram de base de apoio para este trabalho;

À eng[a] Sandra M. Oliveira do Sindareia, pelas informações prestadas sobre os empreendimentos de areia do Vale do Paraíba;

Aos engenheiros especialistas em vidro, Mauro Akerman e Mauro Lúcio Luiz; pela orientação e ensinamentos sobre fabricação de vidro;

Aos amigos do IPT, Isabel e Marsis, pela suas contribuições e ensinamentos de geologia;

Aos amigos do LCT, Carlão, Rafael, Juscelino, Vavá, Alfredo, André, Daniel, Juliana e Mariane, que contribuíram nos ensaios de laboratório e tratamento de dados;

À Carina, pela especial atenção dada em todas as etapas do processo, orientações bibliográficas, elaboração e formatação de textos;

Ao Prof. Dr. Henrique Kahn, pela sua orientação com uma visão crítica e precisa no direcionamento deste trabalho;

A todos, muito obrigado.

EPÍGRAFE

“Nem a mão nua nem o intelecto, deixados a si mesmos, logram muito. Todos os feitos se cumprem com instrumentos e recursos auxiliares, de que dependem, em igual medida, tanto o intelecto quanto as mãos. Assim como os instrumentos mecânicos regulam e ampliam o movimento das mãos, os da mente aguçam o intelecto e o precavêm”.

Francis Bacon (1561 – 1626)

RESUMO

Este trabalho teve como foco a caracterização das areias da Bacia Sedimentar de Taubaté visando avaliar o seu aproveitamento na fabricação de vidros. Os trabalhos de campo consistiram na amostragem do produto de sete minas em operação, na sua caracterização prévia e na escolha de uma amostra cujas características granulométricas se aproximassem mais as especificações para a fabricação do vidro plano. Identificada uma amostra como potencialmente adequada, partiu-se para sua caracterização detalhada; foram realizados ensaios de atrições, separações magnéticas e caracterização do produto não magnético e dos minerais pesados presentes. A amostra estudada apresentou uma distribuição granulométrica compatível com as areias quartzosas hoje utilizadas na fabricação de vidros. Sua composição mineralógica confirmou a presença de feldspato, que contribuirá na fabricação do vidro com a adição de alumina e de álcalis. Há presença de minerais pesados em proporções reduzidas e essencialmente em granulação inferior a 0,30 mm. Os estudos realizados mostraram a viabilidade técnica desta matéria-prima para a fabricação de vidros planos de cor verde, bronze e fumê, porém impróprios para o vidro incolor em razão de teores de Fe_2O_3 remanescentes, associados essencialmente a alteração de feldspatos e recobrimento superficial. Como sugestão para complementação deste trabalho, recomenda-se uma ampla campanha de sondagem para analisar as amostras *in natura*, a serem utilizadas na caracterização tecnológica, cubagem das jazidas, ensaios de beneficiamento para subsidiar futuros estudos de viabilidade do empreendimento de mineração para produção de areia industrial para a fabricação de vidros.

Palavras chave: areia para vidro, separações minerais, caracterização tecnológica

ABSTRACT

The focus was the characterization of the Taubaté Sedimentary Basin viewing to enhance its use for glass manufacturing. The field work consisted in the sampling of the product from seven operating sand mines, in their previous characterization and in the choice of a sample, the grain size distribution of which were closer to those specified for manufacturing flat glass. After identifying a potentially adequate sample, its thorough characterization was conducted; attrition essays, magnetic separation were conducted as well as the characterization of the non-magnetic product and of the heavy minerals present. The sample studied presented a grain distribution compatible to those of quartz sands currently used for glass manufacturing. Its mineralogical composition confirmed the presence of feldspar, which will contribute to glass manufacturing with the addition of alumina and of alkalis. Heavy minerals are present in reduced proportions and essentially in grain size smaller than 0.30 mm. The studies conducted showed the technical viability of this input for manufacturing green, bronze and smoked flat glass, yet it is inadequate for manufacturing colorless grass due to the remaining Fe_2O_3 contents, essentially associated to the alteration in feldspars and superficial cover. As a suggestion to complement this work, an extensive exploration campaign is recommended to analyze samples *in natura*, to be used in technological characterization, deposit cubage, improvement essays to subsidize future viability studies in the mining enterprise to produce industrial sand for glass manufacturing.

Key words: sand for glass applications, mineral separations, technological characterization

SUMÁRIO

pag.

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 OBJETIVOS 15

1.1.1 Objetivo geral 15

1.1.2 Objetivos específicos 15

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 15

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16

2.1 GEOLOGIA E ATIVIDADES MINERÁRIAS DO VALE DO PARAÍBA 16

2.1.1 Fisiografia 16

2.1.2 Geologia regional 18

2.1.3 Recursos minerais da Bacia de Taubaté 23

2.1.4 Explotação de areia na Bacia de Taubaté 28

2.2 O VIDRO 36

2.2.1 Histórico 38

2.2.2 Segmentos do mercado do vidro 40

2.2.3 Evolução do mercado de vidro no Brasil 43

2.2.4 Matérias primas para a fabricação do vidro 44

2.2.5 Composição do vidro 50

2.2.6 Processos produtivos das matérias-primas naturais 52

2.3 A ELABORAÇÃO DE VIDRO 58

3 MATERIAIS E MÉTODOS 62

3.1 AMOSTRAGEM 62

3.1.1 Seleção das áreas objeto de amostragem 63

3.1.2 Descrição da amostragem 65

3.2 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR E SELEÇÃO DE AMOSTRA PARA ESTUDO DETALHADO 66

3.2.1 Preparação das amostras 67

3.2.2 Análise granulométrica 68

3.2.3 Análise química 69

3.3 CARACTERIZAÇÃO DETALHADA 70

3.3.1 Atrição e separação magnética 70

3.3.2 Caracterização dos minerais pesados 73

4 RESULTADOS OBTIDOS 79

4.1 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR E SELEÇÃO DE AMOSTRA(S) PARA DETALHAMENTO 79
4.1.1 Composição química 79
4.1.2 Análises granulométricas 79
4.1.3 Análises granuloquímicas 80
4.1.4 Seleção de amostra para estudos detalhados de caracterização 86
4.2 CARACTERIZAÇÃO DETALHADA DA AMOSTRA 5 86
4.2.1 Atrição e separação magnética 86
4.2.2 Caracterização dos minerais pesados 93
5 CONCLUSÕES 100
5.1 O PRODUTO 100
5.2 O BENEFICIAMENTO 100
5.3 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 101
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102

TABELAS

Tabela 1 - Coluna litoestratigráfica das bacias de São Paulo e Taubaté (CPRM – 2005) 18

Tabela 2 - Processos minerários da Bacia do Taubaté (DNPM agosto 2010) 29

Tabela 3 - Produção, faturamento e preço médio em 2008 (ABIVIDRO, 2009)..... 44

Tabela 4 - Especificação granulométrica para a fabricação de vidros planos (LUIZ, 1999) 45

Tabela 5 - Especificação química das matérias primas para a fabricação de vidro plano (LUIZ, 1999) 45

Tabela 6 - Composição do vidro float - (KOGEL et al., 2006)..... 46

Tabela 7 - Elementos colorantes do vidro (DICKSON, 1951)..... 50

Tabela 8 - Composição química dos diferentes tipos de vidro (ZARZYCKI, 1991)..... 51

Tabela 9 - Classificação granulométrica de areia..... 52

Tabela 10 - Composição química dos feldspatos (% em massa);(BARBA, FELIU et al., 1997) 58

Tabela 11 - Pontos de coleta de cada uma das amostras estudadas 65

Tabela 12 - Composição química das amostras estudadas (% em massa) 79

Tabela 13 - Distribuição granulométrica das amostras estudadas (% em massa retida)..... 80

Tabela 14 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 1..... 81

Tabela 15 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 2..... 81

Tabela 16 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 3..... 81

Tabela 17 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 4..... 82

Tabela 18 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 5..... 82

Tabela 19 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 6..... 82

Tabela 20 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 7..... 83

Tabela 21 - Conteúdos em massa, teores e distribuições para a fração -0,60 +0,105 mm nas amostras estudadas..... 86

Tabela 22 - Comparação entre granulometria de material atricionado e não atricionado 87

Tabela 23 - Resultados da separação magnética de material atricionado e não atricionado..... 87

Tabela 24 - Minerais identificados por DRX nos produtos magnéticos, % massa estimada pelo método RIR 88

Tabela 25 - Estimativa do conteúdo dos minerais pesados (% em massa)..... 98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geográfico dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. 17

Figura 2 - Imagem de satélite, (GOOGLE, 2010) – Municípios produtores de areia do Vale do Paraíba. 17

Figura 3 - Mapa geológico da área de estudos. (CPRM, 2005). 21

Figura 4 - Fluxograma simplificado de produção de areia para a construção civil 34

Figura 5 - Fluxograma básico de produção de areia para a construção civil 35

Figura 6 - Estrutura amorfa do vidro de sílica (sílica amorfa) - 37

Figura 7 - Estrutura cristalina do quartzo (http://www.quartzpage.de/gen_struct.html) 37

Figura 8 - Diagrama da formação da fase vítrea (AKERMAN, 2000) 37

Figura 9 - Segmentos da indústria de vidro (elaborado a partir do Anuário Brasileiro de Vidro – 2009) 41

Figura 10 - Participação dos segmentos da indústria no ano de 2008 (ABIVIDRO 2009) 43

Figura 11 - Evolução da produção e faturamento dos segmentos de embalagem e vidro plano no período de 2003 a 2008 (ABIVIDRO, 2009) 44

Figura 12 - Fluxograma de produção de areia industrial da Mineração Descalvado, adaptado de (ALMEIDA et al., 2004) 55

Figura 13 - Fluxograma de produção de feldspato a partir de pegmatitos - adaptado (BARBA, et al, 1997) 57

Figura 14 - Fluxograma de produção de vidro. Modificado. (AKERMAN, 2000) 59

Figura 15 - Sistema de produção contínua de vidro (AKERMAN, 2000). 61

Figura 16 - Fluxograma de amostragem 64

Figura 17 - Fluxograma dos trabalhos de caracterização preliminar 67

Figura 18 - Procedimento adotado para a formação da pilha e tomada de alíquotas (Kahn, H) 68

Figura 19 - Quarteador Jones (autor: Kahn, H) 70

Figura 20 - Fluxograma dos ensaios de separações minerais 74

Figura 21 - Representação gráfica da distribuição granulométrica das amostras estudadas e do intervalo granulométrico de areia para vidro 80

Figura 22 - Teores de Fe_2O_3 por fração granulométrica nas amostras estudadas 83

Figura 23 - Teores de Al_2O_3 por fração granulométrica nas amostras estudadas 84

Figura 24 - Teores de TiO_2 por fração granulométrica nas amostras estudadas 84

Figura 25 - Teores de K_2O por fração granulométrica nas amostras estudadas 85

Figura 26 - Teores de SiO_2 por fração granulométrica nas amostras estudadas 85

Figura 27 - Difratogramas de raios X comparativos dos produtos magnéticos

atricionado e não atricionado 88
Figura 28 - Difratogramas de raios X comparativos dos produtos não magnéticos atricionado e não atricionado 89
Figura 29 - Imagem de elétrons retroespalhados - não magnético não atricionado 90
Figura 30 - Imagem de elétrons retroespalhados - não magnético atricionado 90
Figura 31 - Presença de incrustações de caulinita-goethita?, SiFeAlO em superfície no quartzo 90
Figura 32 - Inclusão de ilmenita e impregnação superficial de grão de quartzo por caulinita 90
Figura 33 - Incrustação de caulinita SiAlO(Fe) em superfície no quartzo 90
Figura 34 - Incrustação de caulinita em superfície de no quartzo associado com muscovita e zircão 90
Figura 35 - Imagem de elétrons retroespalhados de seção polida do produto atricionado não magnético ao MEV 91
Figura 36 - Imagem de mapeamento de Si, Al, K e Na por EDS (relativa à Figura 36) 91
Figura 37 - Imagem de elétrons retroespalhados de seção polida observada no MEV, apresentando diferentes fases e impregnações nos grãos 92
Figura 38 - Imagem de elétrons retroespalhados de seção polida observada no MEV, apresentando contaminações 92
Figura 39 - Imagem de elétrons retro espalhados ao MEV. Feldspatos parcialmente alterados caulinita em microfraturas e bordas 92
Figura 40 - Idem Figura anterior 92
Figura 41 - Fluxograma e balanço de massa da separação de minerais pesados 93
Figura 42 - Difratograma de raios X do produto com densidade intermediária entre 2,90 e 3,30 94
Figura 43 - Difratograma de raios X do produto afundado em 3,30 magnético em 0,2 A (ilmenita, rutilo, hausmanita e quartzo) 96
Figura 44 - Difratograma de raios X do produto afundado em 3,30 magnético em 0,5 A (monazita, estaurolita, silimanita e xenontima). 96
Figura 45 - Difratograma de raios X do produto afundado em 3,30 não magnético (zircão, rutilo, anatásio, xenontima e silimanita.) 97
Figura 46 - Imagens ao MEV ilustrando os principais minerais pesados 97
Figura 47 - Gráfico da frequência relativa dos minerais pesados 99

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Cava seca apresentando o perfil estratigráfico. 1 solo/vegetação; 2 Quaternário – areia; 3 Terciário – Formação São Paulo – arenitos inconsolidados, argilitos e lamitos 22

Fotografia 2 - Lavra a céu aberto em cava submersa 31

Fotografia 3 - Lavra a céu aberto em cava seca 31

Fotografia 4 - Instalação de beneficiamento de areia sem o aproveitamento da fração fina 1) Peneira fixa e cone desaguador; 2) pilha de areia; 3) alimentação; 4) passante na peneira fixa – pedrisco 32

Fotografia 5 - Beneficiamento com hidrociclone para o aproveitamento de areia fina. 1) peneira fixa e cone desaguador; 2) tanque dosador para alimentar o hidrociclone; 3) hidrociclone; areia média; 5) areia fina 33

Fotografia 6 - Silos utilizados para desaguamento e estocagem de areia. 33

Fotografia 7 - Lote de areia em formação 65

Fotografia 8 - Coleta de uma alíquota de lote de areia formado por hidrociclonagem 65

Fotografia 9 - Distribuição das alíquotas sobre uma lona para a posterior homogeneização 66

Fotografia 10 - Redução da alíquota através do quarteamento da pilha 66

Fotografia 11 - Pilha alongada de uma amostra de 50 kg 68

Fotografia 12 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica 69

Fotografia 13 - Quarteador Jones (autor: Kahn, H) 70

Fotografia 14 - Separador magnético de alta intensidade via úmida Modelo L4, Inbrás-Eriez 72

Fotografia 15 - Mesa oscilatória – alimentação de sólido + água 75

Fotografia 16 - Mesa oscilatória – saída de minerais leves e pesados 75

Fotografia 17 - Mesa Mozley (autor Kahn, H) 76

Fotografia 18 - Separação em líquido denso (funil) 77

Fotografia 19 - Separador magnético Frantz com barreiras (autor Kahn, H) 78

Fotografia 20 - Intermediário 2,90 <d <3,30 turmalina 94

Fotografia 21 - Intermediário 2,90 <d <3,30 - turmalina e sillimanita 94

Fotografia 22 - Pesado magnético em 0,2 A- ilmenita, monazita e granada 95

Fotografia 23 - Pesado magnético em 0,5 A - ilmenita e silimanita 95

Fotografia 24 - Pesado magnético em 0,5 A- monazita e zircão 95

Fotografia 25 - Pesado não magnético em 0,5 A - sillimanita, rutilo e zircão 95

1 INTRODUÇÃO

Jazidas de areia da ordem de milhões de toneladas estão localizadas entre os municípios de Jacareí (SP) e Cachoeira Paulista (SP), na região do Vale Paraíba. Estas jazidas estão geologicamente inseridas na Bacia Sedimentar de Taubaté.

Ao longo de décadas as minerações de areia instaladas nesta região vem abastecendo o mercado de construção civil da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP com um produto de baixo valor agregado. Nos últimos 10 anos, a oferta da areia de brita produzida a partir do beneficiamento dos finos de granito pelas pedreiras da RMSP, a cobrança de pedágios, a fiscalização dos excessos de cargas transportados por caminhões, a fiscalização do poder público com relação à degradação das áreas mineradas, fizeram com que a produção desta região reduzisse de 1,2 milhões para 600 mil metros cúbicos de areia por mês. Produtos de baixo valor agregado têm como principal limitação comercial sua distância do mercado consumidor, cujo valor do frete representa uma significativa fração no custo final do produto.

Paralelamente a esta situação econômica desfavorável, há nesta mesma região do Vale do Paraíba, nos municípios de Jacareí (SP), Caçapava (SP) e Porto Real (RJ), três grandes indústrias de vidro plano que consomem areia quartzosa de regiões mais distantes. O consumo mensal destas três fábricas é superior a 60 mil toneladas e estas indústrias estão ampliando sua capacidade instalada. Seriam consumidoras em potencial da areia das jazidas do Vale do Paraíba, desde que houvesse oferta do produto com as características adequadas ao uso.

Garantir um produto adequado à indústria de vidros envolve investimentos em tecnologia, equipamentos, implantação de procedimentos operacionais, mão de obra qualificada e a própria gestão dos negócios, que hoje está associada a um comércio varejista e, ao mudar para o mercado de areia industrial, deverá operar através de contratos de médio e longo prazo. Nesta condição, as mineradoras trabalhariam com um produto de maior valor agregado propiciando uma maior rentabilidade, reduzindo a escala de produção e ampliando a vida útil das jazidas. Ao mesmo tempo as indústrias se beneficiariam com uma nova alternativa de matérias-prima localizada nas proximidades da fábrica. Foram estes os pontos considerados para a elaboração desta dissertação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Avaliar o potencial de uso de areias da Bacia Sedimentar de Taubaté como matéria-prima quartzo-feldspática para a indústria de vidros planos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as propriedades físicas, químicas e mineralógicas de alguns dos principais depósitos de areia;
- avaliar uma amostra de matéria-prima frente as principais especificações para a fabricação de vidros planos, mais especificamente, dos componentes silicosos - quartzo e feldspato.

1.2 Estrutura da dissertação

A existência de grandes jazidas de areia na Bacia Sedimentar de Taubaté e a presença de duas grandes fábricas de vidros planos nesta mesma região, consumindo matérias-primas silicosas de regiões distantes, motivou o autor deste trabalho a realizar uma investigação sobre a possibilidade do uso da areia destas jazidas na fabricação de vidros planos.

O capítulo 1 é introdutório e realça a importância do conhecimento e do desenvolvimento tecnológico na agregação de valor nas substâncias minerais não metálicas. O capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica, que abrange o contexto geológico da região, as mineradoras de areia ali instaladas, o sistema produtivo das atuais fornecedoras de areia para vidro e, por último, um sucinto estudo sobre a fabricação de vidros. O capítulo 3 diz respeito aos materiais e métodos adotados desde a amostragem da matéria prima, sua preparação e seus ensaios para caracterizá-la, envolvendo a granulometria, composição química e mineralógica, a identificação e quantificação dos minerais deletérios. O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões das análises laboratoriais realizadas.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e as alternativas a serem adotadas para efetivar os estudos apresentados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalhos diversos foram publicados sobre a geologia e os diferentes recursos minerais da Bacia de Taubaté. Há também uma variedade de trabalhos publicados sobre a fabricação de vidros planos. Raras são as publicações sobre o aproveitamento das jazidas de areia desta região para uma aplicação distinta à do emprego como agregados para a construção civil.

2.1 Geologia e atividades minerárias do Vale do Paraíba

2.1.1 Fisiografia

A região escolhida para a realização deste trabalho, conforme apresentada na Figura 1, estende-se ao longo do Rio Paraíba do Sul, entre os municípios de Jacareí e Cachoeira Paulista. Sua largura é relativamente constante, permanecendo entre 15 e 20 km. É limitada à NW pela Serra da Mantiqueira e a SE pelo sistema Quebra Cangalha e Bocaina; as altitudes variam 1.200 a 2.000 m e 800 a 1000 m respectivamente.

Segundo Riccomini (1989), uma faixa sedimentar alongada, na região do médio vale superior é preenchida por sedimentos terciários da Bacia de Taubaté. Recobrindo a sedimentação terciária, ocorrem os depósitos quaternários do Rio Paraíba do sul, que constituem a mais larga e extensa das planícies aluviais da região sudeste.

O eixo central do vale é cortado pela rodovia BR-116, que envolve 12 municípios, de SE para NE: Jacareí, São José dos Campos, Caçapava, Taubaté, Tremembé, Pindamonhangaba, Roseira, Potim, Guaratinguetá, Lorena, Canas e Cachoeira Paulista, conforme apresentados na Figura 2. Outros municípios desta região que não foram citados têm pouca ou nenhuma representatividade na atividade de mineração de areia.

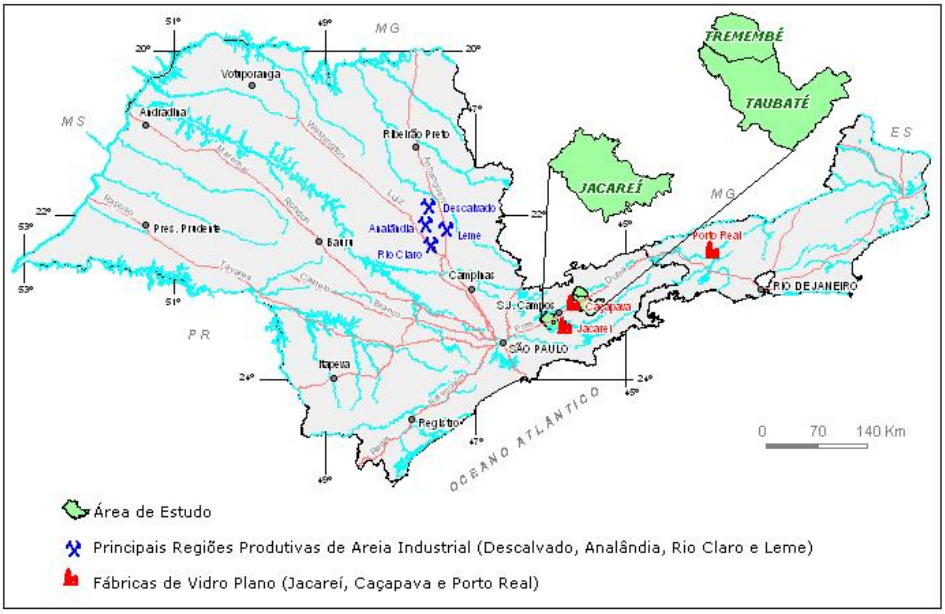


Figura 1 - Mapa geográfico dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

Figura 2 - Imagem de satélite, (GOOGLE, 2010) – Municípios produtores de areia do Vale do Paraíba.

Esta região vem se transformando em um eixo industrial, intercalando a ocupação com as fazendas de gado leiteiro em um regime semi-extensivo.

A área norte da Bacia de Taubaté é dominada por um relevo mais acidentado que constitui a escarpa da Serra da Mantiqueira, restringindo a ocupação humana. Na região de altitude mais elevada a vegetação ainda é natural e a ocupação se deu em planaltos restritos como os de Santo Antônio do Pinhal e Campos do Jordão.

2.1.2 Geologia regional

Riccomini (1989), descreve a região do Vale do Paraíba pertencente ao Rift Continental do Sudeste do Brasil - RCSB. Esta bacia sedimentar, de idade Cenozóica, corresponde a uma feição alongada e deprimida com extensão de aproximadamente 800 km desenvolvida entre as cidades de Curitiba (PR) e Niterói (RJ), paralela à linha da costa atual, da qual dista em média cerca de 70 km, alcançando o Atlântico na sua terminação nordeste.

Esse *rift,* originalmente denominado de Sistema de Rift da Serra do Mar por Almeida (1967), está compartimentado em cinco bacias principais - Curitiba, São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, dispostas segundo a direção ENE.

A Tabela 1 apresenta de forma detalhada a estratigrafia da região estudada, destacando-se as principais unidades estratigráficas e correspondentes litologias.

Tabela 1 - Coluna litoestratigráfica das bacias de São Paulo e Taubaté (CPRM – 2005)

CRONO		Litoestratigrafia	
QUATERNÁRIO	HOLOCENO	Depósitos aluviais de baixos terraços e várzeas	Depósitos aluviais em baixos terraços e várzeas: depósitos incoesos de cascalhos, areias médias e grossas, areias sílticas, siltes e argilas.
		Depósitos coluviais; Depósitos colúvio-aluviais; Depósitos aluvias	Depósitos coluviais: areias argilosas, com grânulos, linhas de seixos na base; depósitos colúvio-aluviais: areias argilosas, com grânulos, micáceas, areia fina siltosa, nívies de areias médias a grossas, localmente conglomeráticas; depósitos aluviais: conglomerados, areias conglomeráticas, areias médias a grossas, níveis de areias finas e silte.
	PLEISTOCENO	Depósitos coluviais; Depósitos colúvio-aluviais	Depósitos coluviais: argilas arenosas e areias argilosas, mal selecionadas, com grânulos e seixos, linhas de seixos basais; depósitos colúvio aluviais: areias, por vezes argilosas, tênues estratificações cruzadas
		Depósitos de antigos terraços do Rio Paraíba do Sul	Depósitos de antigos terraços do Rio Paraíba do Sul: conglomerados polimíticos com seixos e matacões, com arcabouço composto por areia e grânulos, em matriz lamosa, areias grossas com estratificações cruzadas..
		Depósitos de tálus	Depósitos de tálus: seixos a blocos de rochas alcalinas em meio a matriz lamosas de argila, com areia e grânulos.
TERCIÁRIO	NEÓGENO	Formação Pindamonhangaba	Formação Pindamonhangaba: nível conglomerático basal, arenitos argilosos, grossos a finos, arenitos conglomeráticos, siltitos e argilitos.
		Formação Itaquaquecetuba	Formação Itaquaquecetuba: arenitos médios a grossos, arenitos arcoseanos, arenitos conglomeráticos.
	PALEÓGENO	Formação São Paulo; Formação Resende; Formação Tremembé	Formação Resende: paraconglomerados polimíticos e oligomíticos, lamitos arenosos, lamitos argilo-arenosos, areias médias a grossas com níveis conglomeráticos; Formação Tremembé: argilas verdes maciças intercaladas com calcários dolomíticos, folhelhos, margas, arenitos, arenitos arcoseanos conglomeráticos; Formação São Paulo: arenitos médios a grossos, arenitos conglomeráticos, siltitos e argilitos.
CRETÁCEO SUPERIOR		Rochas alcalinas (maciços alcalinos de Itatiaia e Passa Quatro	Sienitos, foiaítos, pulaskitos, quartzo sienitos, fonolitos e tinguaítos.
PRÉ-CAMBRIANO		Embasamento cristalino	Gnaisses, xistos, quartzitos, migmatitos, gnaisses graníticos, milonitos, protomilo-nitos e filonitos

Do ponto de vista de sua dotação mineral é uma região provedora principalmente de matérias-primas minerais para o uso na construção civil (agregados), argilas para fins diversos e bauxita.

Para efeito da contextualização de seus recursos minerais, o arcabouço geológico envolvendo a região de estudo pode ser subdividido em três tipos de terrenos geológicos: embasamento cristalino (dominantemente pré-cambriano), rochas sedimentares terciárias da Bacia de Taubaté e coberturas quaternárias aluvionares.

2.1.2.1 Rochas do Embasamento Cristalino

O substrato da Bacia de Taubaté é caracterizado pelo embasamento cristalino pré-cambriano da região do RCSB, compreendendo rochas metamórficas (milonito-gnaisses, blastomilonitos, milonitos, gnaisses bandados, gnaisses graníticos, xistos, quartzitos e anfibolitos), rochas ígneas (granitos, pegmatitos e aplitos) e migmatitos com estruturas variadas.

Rochas alcalinas, sob a forma de grandes maciços (Passa Quatro, Itatiaia e Morro Redondo), situam-se nos arredores da Bacia de Taubaté. Diques e soleiras de igual composição também estão presentes e são mais freqüentes nas vizinhanças dos grandes maciços. Estas rochas foram datadas com idades entre o final do Cretáceo e o início do Terciário.

Rochas silicificadas acompanham os falhamentos normais escalonados no extremo leste de Taubaté. Nessas faixas, são encontrados diques de rochas alcalinas silicificadas e brechas com fragmentos de rochas do embasamento em matriz silicosa.

2.1.2.2 Sedimentos Terciários da Bacia de Taubaté

Segundo os estudos detalhados de Riccomini (1989), são identificadas cinco unidades litoestratigráficas terciárias na Bacia de Taubaté: Formação Resende, Formação Tremembé, Formação São Paulo, Formação Itaquaquecetuba e Pindamonhangaba (Tabela 1). Essa mesma concepção litoestratigráfica foi adotada no mapa geológico mais recente do Estado de São Paulo (CPRM, 2005) na Figura 3.

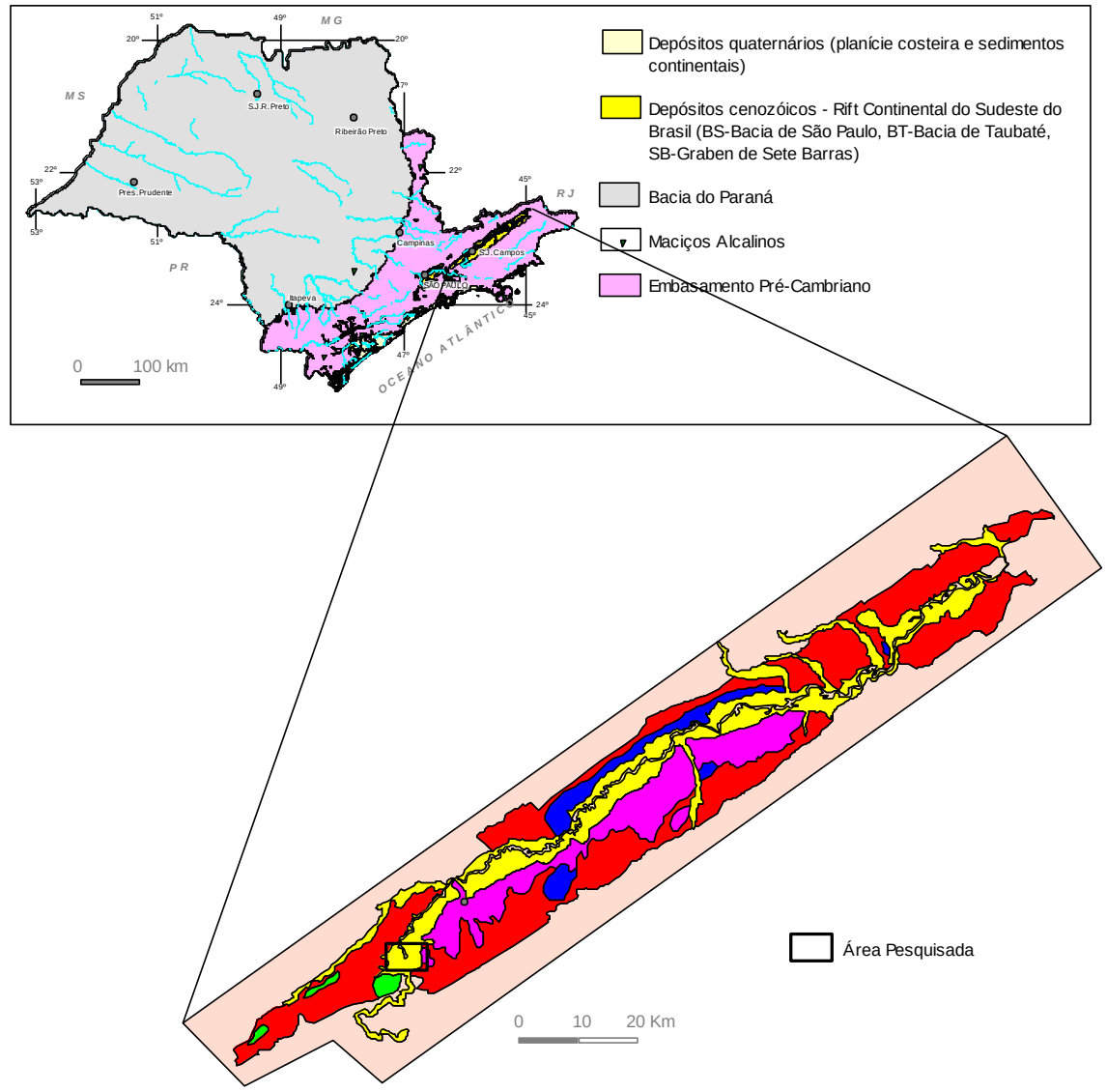
A Formação Resende, de idade Oligocênica é composta de paraconglomerados, lamitos arenosos, areias médias a grossas, com níveis conglomeráticos, que correspondem às fácies de borda de bacia, depositadas em um sistema de leques aluviais associados a planícies de rios entrelaçados.

A Formação Tremembé constitui uma transição gradual da Formação Resende, onde um sistema lacustre substitui os leques aluviais. É composta de argilas verdes

maciças intercaladas com calcários dolomíticos, folhelhos, margas, arenitos, arenitos arcoseanos e conglomeráticos.

A Formação São Paulo é composta de arenitos médios a grossos, arenitos conglomeráticos, siltitos e argilitos, depositados em um sistema fluvial meandrante sobreposto aos leques aluviais da Formação Resende e lacustre da Formação Tremembé.

Na parte superior terciária (Neógeno) situam-se as formações Itaquaquecetuba, composta de arenitos médios a grossos, arenitos arcoseanos e conglomeráticos e Pindamonhangaba, constituída de um nível conglomerático basal, seguida por arenitos argilosos variando de conglomeráticos, grossos e finos, siltitos e argilitos.



QUATERNÁRIO
Depósitos Aluvionares: areia, areia quartzosa, cascalheira, silte, argila e, localmente, turfa.

TERCIÁRIO
Formação Pindamonhangaba: conglomerado basal, com granodecrescência ascendente, grada para arenito progressivamente mais fino, com estratificação cruzada tabular e acanalada; no topo ocorre siltito maciço ou estratificado e pacotes de arenito conglomerático.

GRUPO TAUBATÉ
Formação Resende: diamacitito e conglomerado com seixos, blocos e matacões em matriz lamítica arenosa e gradação normal ou inversa, crostas calcíticas; lamito arenoso e arenito, com estratificação cruzada acanalada e níveis conglomeráticos.

Formação São Paulo: arenito grosso, conglomerático, que grada para siltito e argilito com estratificação cruzada e base erosiva.

Formação Tremembé: alternância de folhelho pirobetuminoso e marga, argila verde maciça, fossilífero, localmente arenito arcoseano que grada para arenito fino.

PRÉ-CAMBRIANO
Embasamento Cristalino

Figura 3 - Mapa geológico da área de estudos (CPRM, 2005).

2.1.2.3 Cobertura Sedimentares Quaternárias

No período Pleistoceno são identificados depósitos de tálus com seixos e blocos de rochas alcalinas em meio à matriz lamosa de argilas, com areias e grânulos; depósitos de antigos terraços do Rio Paraíba do Sul; depósitos coluviais e colúvio-aluviais com argilas arenosas e mal selecionadas, grânulos de seixos e linhas de seixos basais e areias argilosas.

O período Holoceno é representado por depósitos coluviais, colúvio-aluviais e aluviais, compostos de areias argilosas com grânulos e linhas de seixos na base, níveis de areias médias a grossas e conglomerados. No topo da coluna encontram-se os depósitos aluviais em baixos terraços e várzeas, com depósitos incoesos de cascalhos, areias médias e grossas, areias sílticas, siltes e argilas. A Fotografia 1 ilustra os diferentes níveis estratigráficos existentes na Bacia Sedimentar de Taubaté.

Fotografia 1 - Cava seca apresentando o perfil estratigráfico. 1 solo/vegetação; 2 Quaternário – areia; 3 Terciário – Formação São Paulo – arenitos inconsolidados, argilitos e lamitos

2.1.3 Recursos minerais da Bacia de Taubaté

Segundo Cabral Junior et al. (2001), há uma grande variação de concentrações minerais, vinculadas à constituição e à estruturação das bacias sedimentares ou a processos geomórficos cenozóicos. Os depósitos sedimentares desta região têm uma forte presença no fornecimento de agregados miúdos para a construção civil e subordinadamente para a indústria de transformação, representada pelas argilas utilizada como matérias-primas para a indústria cerâmica.

Há no Estado de São Paulo 31 substâncias minerais agrupadas em cinco grandes classes, minerais industriais, minerais metálicos, gemas, recursos energéticos e água subterrânea. De idade Fanerozoica são distribuídos em três ciclos minerogenéticos, o sedimentar permo-carbonífero, o tectono-sedimentar mesozóico-cenozóico e o geomórfico cenozóico. Estes terrenos fanerozóicos correspondem a quase 80% de toda a superfície do Estado de São Paulo. Destas classes, estão presentes na Bacia de Taubaté os minerais industriais representados pela areia e argilominerais, água-subterrânea e energéticos.

A potencialidade mineral da Bacia de Taubaté tem como principal destaque a areia, seguido de argilas. A turfa se apresenta como um terceiro bem mineral, porém de importância bem inferior aos dois primeiros mencionados.

2.1.3.1 Quartzo e feldspato

O quartzo e o feldspato estão presentes nas fácies estudadas por Riccomini (1989), representados por sedimentos arenosos mal selecionados, normalmente estratificados e de granulometria variável, consolidados e inconsolidados e com matriz silto-argilosa presente em quantidades variáveis.

A espessura das camadas varia de centimétrica a métrica, ocorrendo em toda a extensão da Bacia de Taubaté. Estes depósitos representam a ordem de 57% da fonte de abastecimento de areia utilizada na construção civil para a Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, sendo as características destes depósitos detalhadas por Bauermeister (1996).

2.1.3.2 Argilominerais

Na Bacia de Taubaté as camadas mineradas compreendem argilitos e folhelhos verdes lacustres da Formação Tremembé. Os horizontes pelíticos são de porte métrico e chegam a atingir espessuras da ordem de 10 m. Estas argilas são

classificadas como terras-*füller* de baixo rendimento *in natura.* São explotadas na porção central da bacia nas áreas de afloramento do sistema deposicional lacustre de Tremembé, particularmente nas regiões de Caçapava, Tremembé e Pindamonhangaba.

São argilas esverdeadas, de espessura métrica, freqüentemente fossilíferas, associam-se a níveis intercamadas e/ou concreções calcíferas. A esmectita da porção central da Bacia de Taubaté, da Fácies C, foi foram caracterizada como bentonita por Riccomini *et al*(1996).

As argilas bentoníticas são explotadas na região de Taubaté, Tremembé e Pindamonhangaba e destinadas para diversos setores industriais. Após ativação química essas argilas são empregadas no descoramento e recuperação de óleos industriais, como aglomerante em moldes de fundição, agente higroscópico (antiaglomerante) em fertilizantes, clarificante de óleos e gorduras na fabricação de sabonetes e impermeabilizante na produção de tintas e vernizes (RUIZ, 1990).

Também são utilizadas na fabricação de chapas isolantes e na indústria alimentícia para clareamento de óleos comestíveis. Neste último emprego os materiais recebem tratamento ácido ou são misturados com produtos importados para melhorarem seu rendimento. No Vale do Paraíba, as reservas de argilas bentoníticas estão estimadas em 33 milhões de toneladas, das quais 10 milhões correspondem a reservas medidas (CABRAL JUNIOR ET. AL, 2001).

Clorita ocorre associada à esmectita nas argilas esverdeadas da fácies C da Bacia de Taubaté e, mais raramente, nos lamitos da fácies B. Ilita representa o grupo dos minerais micáceos que compõe as argilas verdes maciças da Fácies C, associadas à clorita (RICCOMINI 1989).

2.1.3.3 Turfa

A turfa corresponde ao estágio inicial de carbonificação da matéria orgânica vegetal composta por uma mistura de restos vegetais em diversos graus de decomposição. Segundo Oliveira (2001), a turfa pode ser definida como qualquer matéria vegetal parcialmente decomposta, acumulada em ambiente subaquático.

Além de seu uso como fonte energética, pode ser utilizada na agricultura como insumo para produção de condicionadores de solos, biofertilizantes, substratos de mudas ou aplicação “in natura” no solo. Este mesmo autor relata uma avaliação dos

depósitos de turfa no vale do Rio Paraíba em uma região compreendendo um corredor alongado de direção NE, com cerca de 150 km de comprimento e largura variável entre 15 e 20 km.

A turfa foi classificada segundo suas características macroscópicas em fibrosa, hêmica e sáprica. Quanto ao grau de decomposição, a turfa da área pesquisada situou-se entre fibrosa e hêmica na parte superior, gradando a hêmica somente no terço basal. Foi também classificada com relação ao teor de cinzas, que apresentou uma variação de 5 a 50%, com uma média de 32%.

A espessura média dos depósitos varia entre 4,0 e 5,0 m, atingindo até 9,0 m no eixo principal. É aflorante, havendo capeamento estéril superior a 0,5 m somente em suas bordas. Seu poder calorífico é superior a 3.700 kcal/kg em base seca; o teor de enxofre apresenta valores extremamente baixos, em média 0,2%, e o máximo de 0,5%.

Estudos indicaram que turfeiras localizadas no Vale do Paraíba possuem reservas com teor máximo ponderado de 50% de cinzas e podem ser economicamente explotadas para fins agrícolas. As reservas medidas, base seca, foram de 1,6 milhões de toneladas para turfa com o teor de cinzas de 35%, e 2,0 milhões de toneladas com 50% de cinzas, segundo Oliveira (2001).

2.1.3.4 Linhito

O único depósito de linhito do Estado encontra-se alojado na Bacia de Bonfim. Esta bacia, localizada a cerca de 10 km a sul da Caçapava, constitui um pequeno gráben embutido nos contrafortes graníticos da Serra do Jambeiro e é considerado como um registro relíquia da maior abrangência da sedimentação terciária na Bacia de Taubaté. Seu isolamento teria se dado através de reativação tectônica durante o Pleistoceno.

O preenchimento sedimentar da Bacia de Bonfim é irregular, atingindo espessuras da ordem de 80 m. Os depósitos basais são arenosos e passam gradativamente para uma seqüência pelítica caracterizada por espessas camadas de argilito azulado, onde se intercalam leitos subordinados com concentração de material lenhoso.

A camada principal ocorre no topo da pilha sedimentar, assentada sobre um nível de folhelho pirobetuminoso. O jazimento é lenticular e alcança, em alguns pontos, 5

m de espessura.

A análise faciológica de sedimentos na vizinhança da antiga mina levou Riccomini (1989) a considerar os depósitos como relacionados ao sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo, de idade oligocênica. A ocorrência de linhito em Caçapava é bastante restrita, com estimativas imprecisas de reservas variando entre 25.000 a 152.000 t (ABREU, 1973). Segundo esse autor, uma amostra média de um carregamento de algumas toneladas indicou 16,7% de cinzas, 32,4% de materiais voláteis, 31,1% de carbono fixo, 18,8% de umidade e poder calórico de 3.930 kcal/kg (CABRAL JUNIOR ET AL., 2001).

2.1.3.5 Folhelhos pirobetuminosos

Os folhelhos pirobetuminosos, também conhecidos como “xistos betuminosos”, devido ao seu caráter fóssil e foliáceo, são formados em ambientes aquáticos (marinhos e lacustres), onde restos orgânicos, mormente algálicos, são depositados, em proporções minoritárias, conjuntamente com lamas silicáticas. Diferem, assim, dos carvões, já que estes se desenvolvem a partir de grandes concentrações vegetais, geralmente derivadas de floras terrestres de organização mais evoluída, em ambientes pantanosos dulcícolas ou salobros.

A retorta do folhelho pirobetuminoso produz óleo cru sintético, que, processado em refinarias convencionais, fornece derivados similares aos obtidos diretamente da destilação do petróleo, e gás de bom poder calorífico, com aplicação doméstica e industrial.

O Estado conta com duas zonas de ocorrência de folhelhos pirobetuminosos, situadas na Bacia de Taubaté e associada aos sedimentos permianos da Bacia do Paraná. Na Bacia de Taubaté, os folhelhos oleígenos estão associados à Formação Tremembé (Grupo Taubaté), que ocupa a região central do rift, entre as cidades de Taubaté e Pindamonhangaba.

A Formação Tremembé é composta de um pacote sedimentar essencialmente pelítico e corresponde ao ambiente terminal lacustre do trato deposicional paleogênico do Grupo Taubaté, caracterizado mais propriamente como um sistema do tipo *playa-lake,* descrito por *Riccomini (1989).* As camadas oleígenas intercaladas nessa seqüência representam períodos de maior profundidade do lago Tremembé, concentrando-se nas suas porções centrais.

As primeiras tentativas de aproveitamento destes recursos no Vale do Paraíba datam do final do século XIX, quando foram aproveitados para fornecimento de gás de iluminação em Taubaté, o que permitiu também a comercialização de outros derivados, como querosene, óleos lubrificantes, graxas e parafinas. A explotação, que havia sido paralisada em 1897, foi retomada apenas durante a 1ª Guerra Mundial.

Os estudos prospectivos sobre os folhelhos pirobetuminosos estão concentrados em uma área de 200 km^2, situada entre as cidades de Quiririm e Roseira, onde a Formação Tremembé aflora ou está recoberta por delgado capeamento da Formação Pindamonhangaba.

Os folhelhos oleígenos de melhor qualidade se concentram próximo ao topo da unidade e compõem um pacote econômico de 30 a 35 m de espessura, cujo teor médio oscila entre 4% de óleo *in natura* e 6% em base seca, segundo Moreira (1981), apud Cabral Junior (2001).

2.1.3.6 Bauxita

A bauxita é um bem mineral constituído por proporções variadas de hidróxidos de alumínio com diferentes graus de hidratação e, secundariamente, por argilominerais, hidróxidos de ferro e quartzo. É a principal fonte de obtenção do alumínio metálico. Fabricação de alumina, de sais de alumínio, abrasivos, cimento aluminoso, como escorificante em altos fornos, na indústria cerâmica e de refratários são outras aplicações da bauxita.

As bauxitas são formadas a partir da alteração de rochas ricas em alumínio, com a lixiviação da sílica e a concentração residual de hidróxidos de alumínio. Essas condições são encontradas em regiões de climas tropicais e subtropicais (quentes e úmidos) com estações secas e chuvosas bem definidas.

Esta bauxita está presente na região estudada em depósitos de pouca expressão (Lavrinhas e Queluz) resultantes da alteração meteórica de rochas alcalinas de idade Mesozóica. Parte destes depósitos se destina à indústria cerâmica (abrasivos e refratários) e química (produção de sulfato de alumínio).

2.1.3.7 Metálicos

As ocorrências fanerozóicas paulistas se limitam a mineralizações auríferas detríticas tipo *placer*, existentes em aluviões ou terraços aluvionares cenozóicos, dispostos principalmente sobre os terrenos precambrianos da parte leste do Estado. Estas ocorrências resultam da ação erosiva e sedimentar do conteúdo de ouro de mineralizações primárias do embasamento cristalino (ouro em veios de quartzo e formações ferríferas).

Na Bacia de Taubaté há discretas ocorrências aluvionares, resultantes da presença relativamente próxima do embasamento. No Estado não existe produção oficial de ouro. Das ocorrências cenozóicas, as mais significativas foram ou são submetidas à garimpagem rudimentar. O ouro tende a mostrar-se como finas palhetas submilimétricas ou mais raramente como pequenas pepitas milimétricas, com teores médios entre 0,05 g/t e 0,5 g/t (CABRAL JUNIOR ET AL., 2001).

2.1.4 Explotação de areia na Bacia de Taubaté

A região de interesse é composta por 12 municípios, tendo na extremidade SW o município de Jacareí e a NE o município de Cachoeira Paulista. De acordo com o cadastro mineiro do Departamento Nacional de Produção Mineral DNPM[1], dos 1.157 processos vigentes 693 são de areia (60% do total). Dos empreendimentos já implantados com concessões de lavra ou licenciamentos, há um montante de 184, dos quais, 148 são de areia, representando 80% do total, conforme apresentado na Tabela 2. É relevante a concentração de concessões de lavra nos municípios de Jacareí, Tremembé e Taubaté.

A produção atual de areia é da ordem de 600 mil metros cúbicos por mês, segundo informação verbal[2]. Ao final da década de 1980, a produção chegou atingir 1,5 milhões de metros cúbicos/mês, quando havia cerca de sessenta empresas operando. Fatores diversos como a exaustão das reservas de Jacareí, o aumento da produção de areia de brita[3] na RMSP[4], a criação do "Zoneamento Minerário da Bacia do Paraíba do Sul", com restrições para o licenciamento de novas áreas, a

---

[1] DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral – Órgão vinculado ao Ministério das Minas e Energia que controla toda a atividade de mineração no país.

[2] Minerador, LOURENÇO, C.J., (2010).

[3] Aproveitamento dos finos de brita de granito através da classificação em via seca ou úmida.

[4] RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

maior exigência e controle dos órgãos ambientais e o controle das cargas dos caminhões contribuíram para a redução da produção de areia do Vale do Paraíba (informação verbal)[1].

Tabela 2 - Processos minerários da Bacia do Taubaté (DNPM agosto 2010)

	Processos Minerários			**Concessões de lavra ou licenciamento**		
	Total	Areia	% areia	Total	Areia	% areia
Jacareí	121	71	59	30	28	93
São José dos Campos	109	52	48	14	5	36
Caçapava	140	94	67	24	22	92
Taubaté	136	76	56	37	24	65
Tremembé	180	153	85	37	37	100
Pindamanhangaba	200	81	41	18	14	78
Roseira	63	33	52	12	11	92
Potim	22	7	32	2	1	50
Guaratinguetá	69	35	51	3	2	67
Lorena	44	24	55	1	1	100
Canas	17	16	94	1	1	100
Cachoeira Paulista	56	51	91	5	2	40
Total	1.157	693	60	184	148	80

Atualmente, o número de empresas associadas ao Sindicado da Indústria de Extração de Areia do Estado de São Paulo, sub-região do Vale do Paraíba é por volta de 35. Deste total, seis empresas respondem por cerca de 50% da areia produzida (informação verbal)[2].

A quase totalidade da produção de areia da Bacia de Taubaté está voltada para o mercado da construção civil; distribuídas entre o mercado local, litoral norte, à região

[1] OLIVEIRA, SM – (SINDAREIA)

[2] Minerador, LOURENÇO, C.J. (2010)

de Campinas, Jundiaí, Bragança Paulista e outros à RMSP.

2.1.4.1 Características dos depósitos de areia.

O capeamento das jazidas de areia é composto por camadas de solos, turfa, argila e silte, cujas espessuras variam de 0,5 a 6,0m. Freqüentemente os solos são ricos em matéria orgânica, constituindo camadas turfáceas, sendo comercializados como substratos para viveiros de plantas ornamentais e para outros segmentos da agricultura. Os solos mais pobres são estocados para a recomposição das áreas mineradas, quando da exaustão das jazidas.

Quando o capeamento é constituído por argilas, esta é lavrada, homogeneizada, estocada, sendo posteriormente comercializada como matéria-prima para a indústria cerâmica. Outro destino é a construção de barragens de contenção de rejeitos.

A classificação dos depósitos arenosos pode ser feita em dois grupos de acordo com o período geológico de sua formação. As camadas de areia do quaternário são em geral inconsolidadas, apresentam uma espessura de até 4 m e são lavradas em cavas submersas. Os depósitos do período Terciário são intercalados com lamitos, argilitos e arenitos, constituídos de misturas em proporções variáveis de areia e argila com diferentes níveis de consolidação. Suas camadas podem ultrapassar 50 m de espessura e sua lavra só é possível através do método de cava seca.

2.1.4.2 Lavra

A lavra é feita a céu aberto na modalidade de cava, podendo ser submersa ou seca. A espessura das camadas de areia, sua consistência física e o volume de água disponível definem o método de lavra.

As etapas da lavra consistem em decapeamento, que compreende a retirada do solo turfoso, silte, ou argila, até atingir a camada de areia, utilizando-se escavadeira hidráulica e caminhões basculantes. Este material é depositado um local adequado para utilização futura.

Na modalidade de cava submersa, conforme representado na Fotografia 2, abre-se uma cava onde será instalada a draga. Injeta-se água o suficiente para formar a polpa, que é bombeada para as instalações de beneficiamento. Em casos de areias medianamente consolidadas, são acoplados na extremidade do tubo de sucção acessórios que auxiliam na desintegração da areia.

Na modalidade cava seca, representado na Fotografia 3, o desmonte é feito por

monitores hidráulicos[1], quando a areia é inconsolidada. Sendo esta medianamente consolidada, o desmonte é feito por uma escavadeira hidráulica e o seu transporte até a draga é feito por gravidade. Da draga é feito o bombeamento para o beneficiamento. Utiliza-se também o transporte da areia por caminhões.

Fotografia 2 - Lavra a céu aberto em cava submersa

Fotografia 3 - Lavra a céu aberto em cava seca

2.1.4.3 Beneficiamento

Consiste na separação da fração útil do rejeito e na classificação granulométrica do

[1]Bocais metálicos montados sobre tripés nos terminais das tubulações, utilizados para a injeção de água sob pressão para efetuar o desmonte de areia. São também denominados *canhões.*

produto. Utiliza-se o peneiramento em via úmida e as empresas mais estruturadas utilizam hidrociclones. Instalações com associação entre peneiras e hidrociclones têm maiores índices de recuperação e classificam melhor seus produtos.

A Fotografia 4 ilustra uma das formas mais simples de beneficiamento. Utiliza-se uma peneira fixa para separar a areia do pedrisco, associada a um cone desaguador. A água com materiais particulados (argila e silte) são descarregados na barragem de rejeito, a areia é descarregada sob o cone e o pedrisco (acima de 5 mm) se forma em uma pilha ao lado.

Fotografia 4 - Instalação de beneficiamento de areia sem o aproveitamento da fração fina 1) Peneira fixa e cone desaguador; 2) pilha de areia; 3) alimentação; 4) passante na peneira fixa – pedrisco

Esta operação é simples, de baixo custo, porém apresenta uma baixa recuperação dos finos. Empresas que utilizam este método remetem boa parte de sua produção para as barragens, formando novos depósitos de areia fina, que oportunamente poderão ser retomados.

O aproveitamento da fração de areia fina em uma jazida se faz com a utilização de hidrociclones, o que aumenta a produção e reduz a emissão de partículas para a

barragem de rejeito. Ao longo de décadas se produzia areia sem o aproveitamento da fração fina e pode concluir que haja uma reserva significativa de areia fina nestas barragens, podendo um dia ser objeto de uma nova lavra.

A Fotografia 5 ilustra uma instalação de beneficiamento onde se aproveita a fração fina.

Fotografia 5 - Beneficiamento com hidrociclone para o aproveitamento de areia fina. 1) peneira fixa e cone desaguador; 2) tanque dosador para alimentar o hidrociclone; 3) hidrociclone; areia média; 5) areia fina

A areia produzida pode ser descarregada no pátio ou nos silos, conforme mostrados na Fotografia 6. Estes silos, com capacidade de 20 a 25 m^3, tem a função de desaguamento da areia e eliminam a necessidade de uma pá carregadeira para carregar os caminhões. Quando o volume de produção é superior ao das vendas, retira-se a areia dos silos e a deposita nos pátios.

Fotografia 6 - Silos utilizados para desaguamento e estocagem de areia.

Havendo presença significativa de seixos, emprega-se *trommel* na etapa inicial do beneficiamento.

Os produtos são destinados ao emprego direto como agregado fino na construção civil. A Figura 4 mostra o fluxograma de uma instalação simples de produção de areia e a Figura 5 uma instalação de beneficiamento mais estruturada, onde se aproveita areia fina.

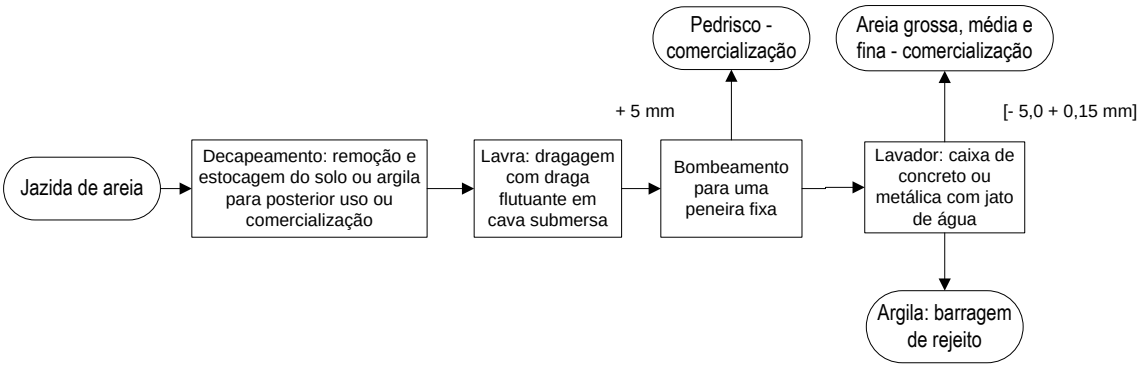


Figura 4 - Fluxograma simplificado de produção de areia para a construção civil

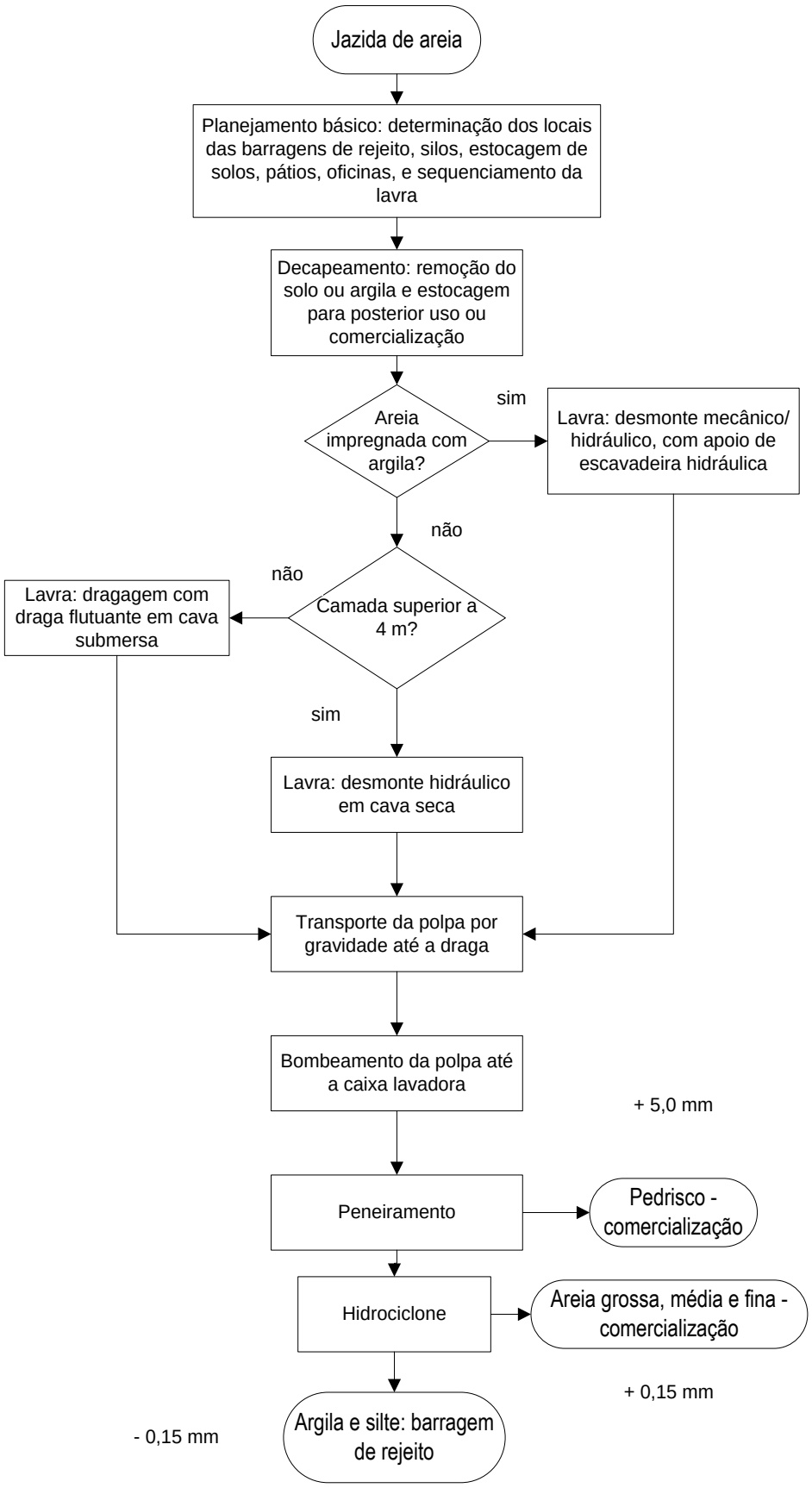


Figura 5 - Fluxograma básico de produção de areia para a construção civil

2.1.4.4 Perspectivas para o setor

À medida que a competitividade deste setor aumenta, reduz-se a margem de lucro, que é compensada pelo aumento da produção. Este aumento de produção acelera o processo de exaustão das jazidas. Deve-se levar em consideração que as áreas de expansão urbana, as atividades agro-pecuárias e a criação de áreas de preservação são fortes concorrentes da atividade de mineração.

A perspectiva para o setor em médio prazo é a redução da produção que acontecerá com a exaustão das melhores jazidas, fato que poderá ocorrer nos próximos 10 anos. A demanda poderá aumentar, porém os custos de produção para jazidas de menor potencial poderão ser elevados e não suportarão a concorrência da areia obtida a partir dos finos de brita. Ao longo prazo prevê-se que a produção de areia desta região ficará restrita ao mercado local e possivelmente ao do litoral norte[1].

A busca pelo desenvolvimento e produção de um bem de maior valor agregado poderá alterar este cenário. Reduz-se o volume de produção, mantêm-se o faturamento e eleva-se a rentabilidade. Para atuar em segmentos com produtos de maior valor agregado, será necessária uma mudança de cultura no setor, envolvendo maior controle de processo, qualificação dos trabalhadores investimentos em laboratórios e na administração geral do negócio.

Kogel *et al.* (2006) enfatiza que o produtor de minerais industriais deverá adotar sistemas de qualidade no gerenciamento de seu negócio, conhecendo as necessidades e especificações de seus clientes, emitindo certificados de seus produtos a cada lote e não permitindo o envio de materiais fora de especificação.

2.2 O vidro

Segundo a *American Society for Testing and Materials,* ASTM[2], o vidro é um produto inorgânico de fusão que foi resfriado até uma condição rígida sem ocorrer cristalização. Apresenta características de um sólido, porém sem estrutura cristalina. Seu estado físico é a transição vítrea.

Akerman (2000, p-7) salienta que há uma dificuldade de se conceber a definição da ASTM, uma vez que há vidros de origem inorgânica ou que foram formados sem a

---

[1] Minerador – LOURENÇO, C.J. (2010)

[2] ASTM – American Society for Testing and Materials- fundada nos Estados Unidos em 1898. É uma entidade normatizadora e possui mais de doze mil normas cadastradas.

prévia fusão. Este autor prefere a seguinte definição: - “Vidro é um sólido, não cristalino, que apresenta o fenômeno de transição vítrea”.

Shelby (1997) descreveu o vidro como um sólido amorfo, caracterizado pela ausência completa de ordem, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material inorgânico, orgânico ou metal, formado por qualquer técnica, que exibe um fenômeno de transição vítrea é o vidro. A Figura 6 mostra a estrutura amorfa do vidro de sílica, enquanto a Figura 7 ilustra a estrutura do mineral quartzo, cuja composição química é a mesma.

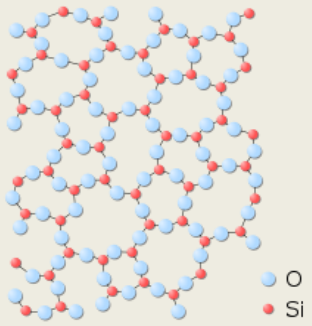


Figura 6 - Estrutura amorfa do vidro de sílica (sílica amorfa) -

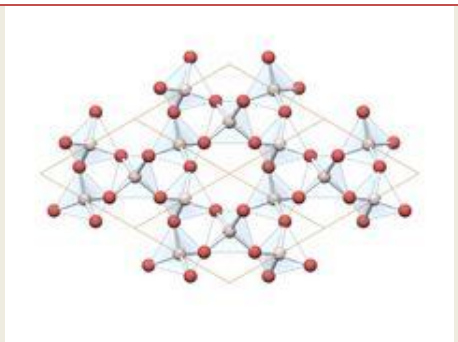


Figura 7 - Estrutura cristalina do quartzo (http://www.quartzpage.de/gen_struct.html)

Varshneya (1994) relata a dificuldade de distinguir a fase amorfa da cristalina. O que existe é uma zona de transição, chamada transição vítrea, que pode ser observada na Figura 8 entre o ponto “E” e “F”. Esta figura também mostra a diferença de volume influenciada pela sua velocidade de resfriamento.

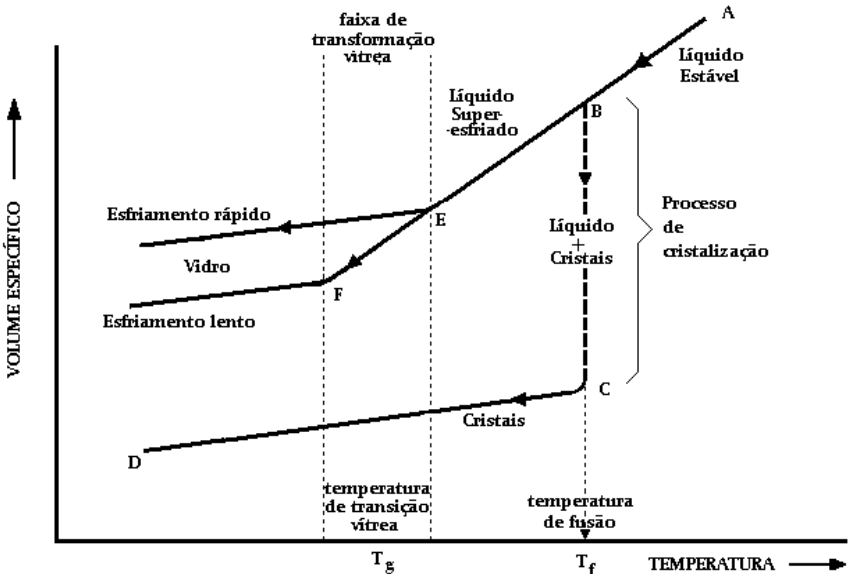


Figura 8 - Diagrama da formação da fase vítrea (AKERMAN, 2000)

2.2.1 Histórico

Há controvérsias sobre a descoberta do vidro, mas acredita-se que aconteceu ao acaso por volta de 5000 a.C. Mercadores retornavam do Egito para a Fenícia, (território hoje ocupado pela Síria e Líbano), acenderam uma fogueira na areia e utilizaram blocos de *natrão, ou trona*[1] para apoiar uma vasilha. As duas substâncias; trona e sílica, quando aquecidas fundiram e deram origem a uma massa de aparência sólida e transparente (ABVIDRO, 2009). Estava descoberto o vidro.

Evidências históricas sobre a existência do vidro datam de 4000 a.C. em objetos encontrados em túmulos. Sua utilização pode estar relacionada à queima de peças cerâmicas onde o vidro era utilizado como esmalte.

Ao longo de séculos seguintes o vidro era pouco conhecido e utilizado somente como objetos de adorno. Por volta de 30 a.C., foi desenvolvida a técnica do sopro[2] e o vidro passou a ser utilizado como um utensílio doméstico. Cortada a bolha, o restante do material era derramado sobre uma superfície plana que, uma vez endurecida, em forma de placa plana adquiria uma nova função, o uso em janelas e vitrais.

Por volta do ano 100 d.C. a técnica do sopro e a confecção do vidro plano chegaram a Roma, ampliando assim sua fabricação e comercialização. As peças eram utilizadas como dos objetos de adorno e o vidro plano entrou para as janelas das residências de famílias abastadas, de catedrais e palácios.

Com o desenvolvimento da técnica da fabricação do vidro, por volta do ano 1200, todos os vidreiros foram confinados na ilha de Murano, próximo a Veneza, para evitar a disseminação desse conhecimento para outros povos.

Uma vez confinados, a concentração das atividades e a troca de experiências propiciaram a criação de vidros muito transparentes, utilizados como finos utensílios de mesa, abrindo espaço para o início da fabricação de lentes que posteriormente seriam utilizadas em binóculos (1590) e telescópios (1611) (AKERMAN, 2000).

Segundo Zarzycki (1991), relatos confiáveis sobre o desenvolvimento da tecnologia da fabricação de vidro só apareceram nos anos de 1673 a 1676. Considerado pelo

---

[1] Trona: carbonato natural de sódio [Na_3 (CO_3) (HCO_3) • 2 (H_2O)], de poucas ocorrências naturais.(www.webmineral.com)

[2] Sopro: consistia em colher o vidro líquido com um tubo oco de 1,5 a 2,0m (vara de sopro), por onde se soprava formava-se uma bolha, que adquiria diferentes formas quando colocadas em um molde (garrafas, vasos).

autor, a obra *Optics,* Isaac Newton, foi o primeiro livro publicado em que se utilizaram métodos científicos. Podem também ser citados os livros L' Arte Vetraria, de Nery's A. (1612), *Art Of Glass* (1662) de Kunckel's e Glasmacherkinst.

Em 1665, durante o reinado de Luis XIV na França, foi criada a *Compagnie dês Glaces*. Inicialmente produziam-se vidros no processo da vara de sopro. Em 1685, desenvolveu-se um método de produção em que se espalhava a massa líquida de vidro sobre uma superfície plana e, em seguida, passava-se sobre ela um rolo. Feito o polimento, este vidro era utilizado para a fabricação de espelhos (ZARZYCKI, 1991).

No século XVIII, os conhecimentos da física e química propiciaram o desenvolvimento de processos mais produtivos e eficientes. Nas publicações da *Encyclopédie* (1765-1772) de Diderot e D'Alembert, havia ilustrações e descrições detalhadas de processos de produção de vidro. *Encyclopédie Méthodique* (1791) complementa as obras sobre a fabricação de vidros.

O século XIX foi caracterizado por grandes avanços iniciados no final do século anterior. Destacaram-se os trabalhos de Fraunhofer, J. (1787-1826), em que se desenvolveram processos de produção de lentes através de estiramento de vidros (ZARZYCKI, 1991).

Naquele período a Alemanha foi o berço dos estudos e também o local onde ocorreu desenvolvimento da indústria ótica. Abbe e Schott iniciaram e aprofundaram os estudos da composição do vidro para o desenvolvimento de lentes. Carl Zeiss e seu filho Roderich iniciaram a produção de lentes de alta qualidade no final do século. Cientistas como, Michael Faraday, William Vernon Harcourt e Stokes, tiveram um papel preponderante nesse desenvolvimento. (ZARZYCKI, 1991).

Fornos contínuos propiciaram o aumento da escala de produção para vidros planos que foram desenvolvidos e patenteados nos Estados Unidos. Em 1886, em Ashley, Inglaterra, desenvolveu-se o primeiro processo mecanizado para a produção de garrafas e a primeira fábrica automatizada de garrafas iniciou sua produção em 1898 (ZARZYCKI, 1991).

O século XX teve seu início marcado pelos estudos da reação química entre sólidos, de grande interesse aos cientistas do vidro. Foram publicados estudos sobre reação química envolvendo carbonato de sódio, carbonato de cálcio, alumina e sílica. (ZARZYCKI, 1991).

Entre 1915 e 1916, durante a primeira guerra, os ingleses, percebendo seu atraso em relação aos alemães na tecnologia da fabricação do vidro fundaram a *"Society of Glass Technology*" e o *Department of Glass Technology* na Universidade de Sheffield. Criou-se neste ano uma *joint venture* unindo indústrias e universidades, que propiciou um salto em desenvolvimento. A década de 1920 foi caracterizada por grandes avanços na produção e polimento do vidro prensado.

O último grande salto de desenvolvimento aconteceu com a invenção do processo *Float*[1], na década de 1950. Este processo foi desenvolvido simultaneamente nos Estados Unidos pela Ford e na Inglaterra pela Pilkington. Por poucos meses de diferença, a Pilkington requereu e obteve a patente desse processo.

Tubos de televisão, indústrias óticas, a utilização dos silicatos de boro para a fabricação de *Pirex,* que apresenta elevada resistência ao choque térmico, produção de bulbos de lâmpadas, fibras de vidro, fibras óticas para telecomunicações e instrumentos cirúrgicos e o uso das propriedades elétricas nas fibras óticas fizeram parte do desenvolvimento no século passado.

Ao longo dos milênios, especialmente no último século, houve uma expressiva evolução nos processos de fabricação de vidro, caminhando do artesanal para o industrial e este, com vários níveis de automação e sofisticação. Permaneceram as matérias-primas básicas para a fabricação do vidro sodo-cálcico, a sílica e o carbonato de sódio (barrilha), hoje produzido por processo industrial.

As primeiras indústrias de vidro no Brasil foram constituídas no início do século XX, com a implantação das fábricas da Santa Marina, Cisper e Nadir Figueiredo. A partir da década de 1980 a indústria brasileira de vidros brasileira passa a ser reconhecida mundialmente.

2.2.2 Segmentos do mercado do vidro

Diversas características do vidro o fazem participar de nosso cotidiano e por esta razão está presente em vários segmentos de mercado. É um produto totalmente reciclável, uma massa de cacos de vidro irá gerar uma mesma massa de produtos acabados. É retornável, como garrafas de cerveja e refrigerante e é reutilizável, podendo ter diferentes usos do original. A transparência é uma de suas principais

[1] Float: Processo em que a massa vítrea, ao sair do forno se escoa e solidifica sobre um banho com estanho líquido, formando uma lâmina de espessura controlada.

características e o fez presente e insubstituível na indústria automobilística e construção civil.

A Figura 9 ilustra a segmentação do mercado de vidro segundo sua aplicação e aos processos de fabricação.

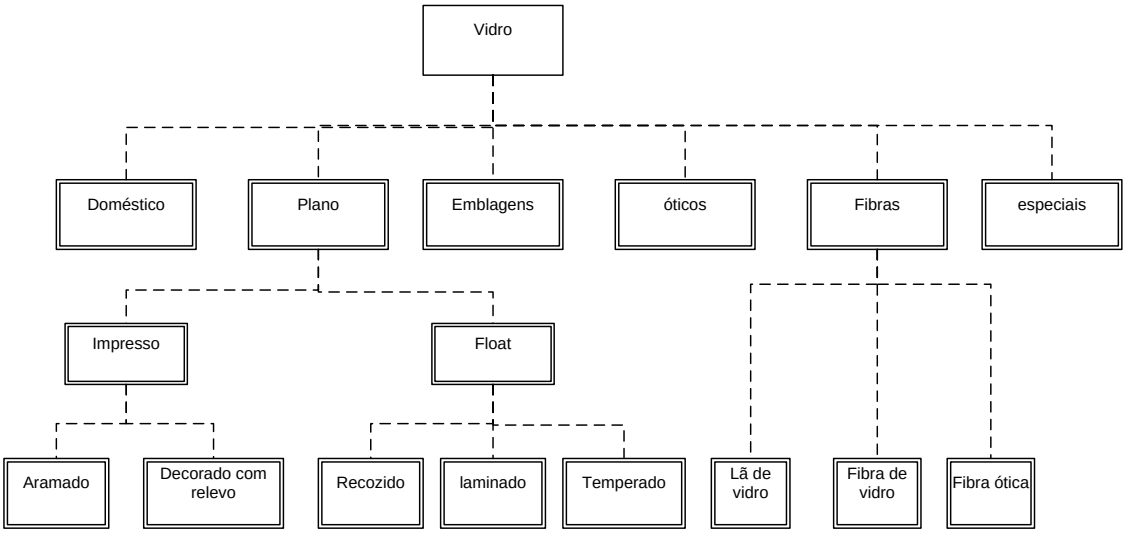


Figura 9 - Segmentos da indústria de vidro (elaborado a partir do Anuário Brasileiro de Vidro – 2009)

Dentre segmentos os mais importantes, destacam-se:

2.2.2.1 Vidros domésticos

Os adornos de vidro acompanham o Homem desde sua mais remota história. Hoje está presente nas residências, hotéis, restaurantes, em uma grande variedade de formatos, como copos, taças, pratos, travessas que resistem a elevadas temperaturas em fornos convencionais ou micro-ondas. A transparência, o baixo preço e a facilidade de limpeza são atributos que contribuem para a ampliação de seu uso.

2.2.2.2 Vidro plano

É fabricado em chapas pelos processos *float* ou impresso[1]. Os vidros *float* podem ser recozidos, laminados e temperados, que também são denominados vidros de segurança. O processo de recozimento se dá na saída do forno para eliminar as

[1] Impresso: processo em que o vidro ao sair do forno, em fase de endurecimento recebe uma impressão de um desenho. Em geral são translúcidos, tem as denominações comerciais de aramado, martelado, canelado, etc. São empregados nas indústrias de móveis e construção civil.

tensões internas. É um vidro comum.

Os vidros laminados são compostos por duas ou mais chapas de vidro, intercalados por películas de Polivinil Butiral – PVB, prensados sob ação do calor. Quando quebrados, os cacos ficam retidos na película de PVB, aumentando sua segurança em caso de acidentes. Apresentam como características uma baixa permeabilidade acústica e uma redução de raios ultravioleta do sol (ABIVIDRO, 2009).

Os temperados recebem um tratamento térmico, que consiste em um rápido aquecimento e resfriamento e tem o objetivo de aumentar sua resistência à quebra e também aos choques térmicos. Quando quebrados, dividem-se em múltiplos pedaços reduzindo suas superfícies cortantes.

O vidro impresso recebe uma textura em uma das faces ao sair do forno. Quando produzidos com uma malha metálica em seu interior são denominados aramados. Se quebrados acidentalmente, retém os cacos em seu interior. Esta malha é também decorativa. Usualmente é utilizado em indústrias de móveis e na construção civil.

2.2.2.3 Vidros de embalagem

São utilizados para embalagens de bebidas, alimentos, cosméticos, perfumarias, produtos farmacêuticos e outros. A transparência, associada às inúmeras formas e tamanho que podem ser fabricados conferem ao vidro um amplo e crescente uso neste segmento.

2.2.2.4 Vidros óticos

A ausência de estrutura cristalina faz do vidro um sólido isotrópico, cujas propriedades óticas são invariáveis em qualquer direção. Teve como marco a fabricação do primeiro microscópio no século XVII, dando início ao desenvolvimento de lentes para a indústria ótica, envolvendo óculos, binóculos, microscópios, câmeras fotográficas, filmadoras.

2.2.2.5 Fibras

Pode-se dividir o segmento de fibras em lã de vidro, fibra de vidro e fibras óticas. As primeiras atuam como isolantes térmicos e acústicos e são utilizadas nas indústrias de refrigeradores, trocadores de calor e refratários. É um material leve, resistente e vem substituindo o metal, plástico e madeira, na indústria naval, automobilística,

mecânica e na construção civil.

As fibras óticas revolucionaram a indústria de telecomunicações e está presente em equipamentos cirúrgicos. Um feixe de luz incide em uma extremidade da fibra e é transmitida por meio de reflexões sucessivas. A fibra possui pelo menos duas camadas, o núcleo e o revestimento.

2.2.2.6 Vidros especiais

A gama de elementos naturais dos quais se é possível fabricar vidros dá a estes uma infinita variedade de propriedades térmicas, mecânicas, óticas, eletromagnéticas, o que pode direcionar seu uso para as mais diversas aplicações.

2.2.3 Evolução do mercado de vidro no Brasil

Conforme apresentado na Figura 10, dos quatro principais representantes o vidro plano e embalagem representaram 66% em faturamento e 86% em volume de produção. No mesmo período, os vidros técnicos e os domésticos representaram 34% em faturamento e 14% em volume de produção. (ABIVIDRO, 2009).

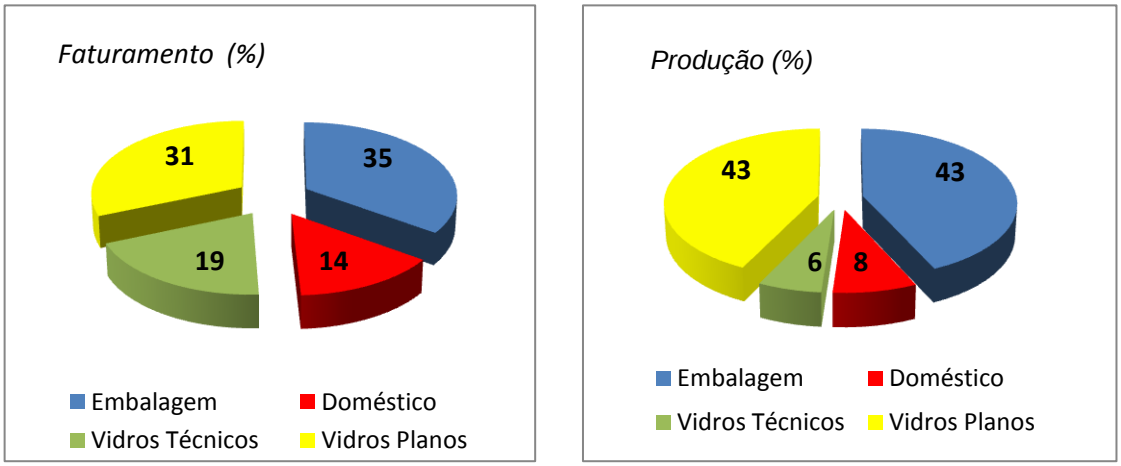


Figura 10 - Participação dos segmentos da indústria no ano de 2008 (ABIVIDRO 2009)

Comparando os dois maiores segmentos representados na Figura 11, constata-se que ambos tiveram considerável crescimento em faturamento. O volume de produção do segmento de embalagens manteve-se inalterado, enquanto o de vidros planos aumentou.

Evidencia-se que o segmento de embalagens teve um aumento de preços médio

superior ao de vidros planos. As indústrias de embalagens são caracterizadas por empreendimentos de pequeno e médio porte e as de vidro plano são indústrias de grande porte.

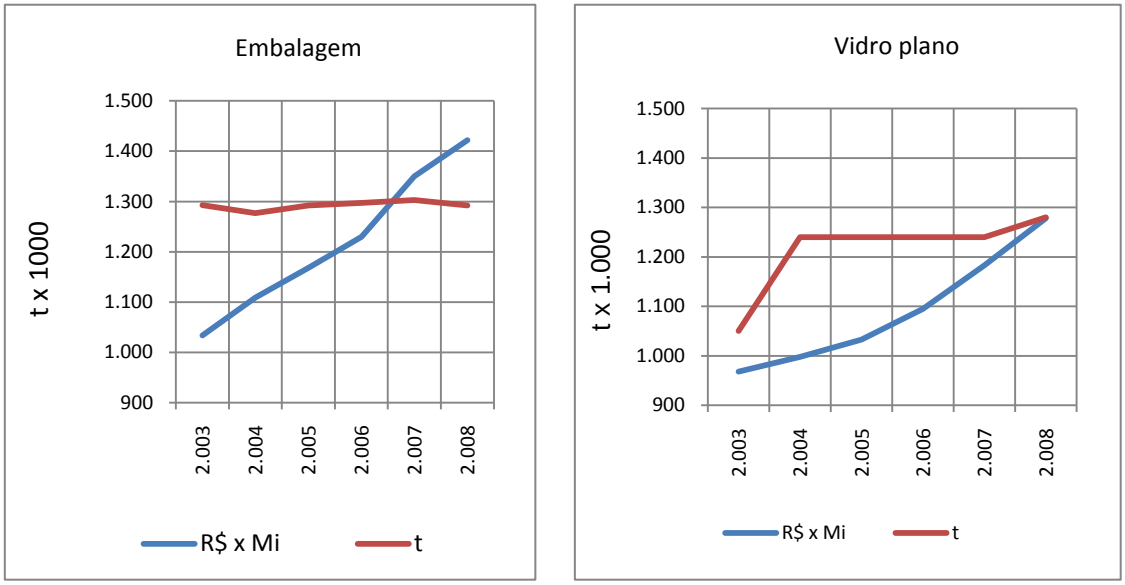


Figura 11 - Evolução da produção e faturamento dos segmentos de embalagem e vidro plano no período de 2003 a 2008 (ABIVIDRO, 2009)

A Tabela 3 mostra os valores de produção e faturamento dos diferentes segmentos. Constata-se que os preços médios dos vidros planos e de embalagens estão na mesma ordem de grandeza, R$1,00/kg, enquanto o preço médio dos vidros domésticos é duas vezes superior, e o dos vidros técnicos, quatro vezes superior.

Tabela 3 - Produção, faturamento e preço médio em 2008 (ABIVIDRO, 2009)

	Faturamento	**Produção**	**Preço médio**
	R$ (Milhões)	t (mil)	R$/kg
Embalagem	1.422	1.292	1,10
Doméstico	582	240	2,43
Vidros Técnicos	789	182	4,34
Vidros Planos	1.278	1.280	1,00

2.2.4 Matérias primas para a fabricação do vidro

Duas são as principais características requeridas das matérias primas pela indústria do vidro. A primeira é a granulometria, cujos grãos deverão situar-se entre 0,1 a 2 mm. Grãos maiores demandam muita energia para a fusão e menores geram pó que se perde durante o processo como materiais particulados (AKERMAN, 2000).

Segundo Luiz (1999), a especificação granulométrica para a fabricação de vidros planos é mostrada na Tabela 4. Nota-se nesta tabela que a especificação granulométrica varia de acordo com cada matéria prima.

Tabela 4 - Especificação granulométrica para a fabricação de vidros planos (LUIZ, 1999)

	mm	Matérias primas (massa %)				
		Areia quartzosa	**barrilha**	**dolomita**	**calcário**	**feldspato**
maior que	2,00					
	1,25		0,33 ± 0,21		3,43 ± 0,77	
	0,88	0,04 ± 0,03				
	0,60	2,61 ± 0,96				
	0,42					
	0,15					
menor que	0,10	1,76 ± 0,20		7,19 ± 6,95	8,11 ± 1,55	
	0,074	0,18 ± 0,04				27,1 ± 4,5

A segunda característica é a composição química, que está diretamente associada à composição mineralógica. A Tabela 5 indica a especificação e tolerâncias para a fabricação de vidros planos pelo processo *float*. Cada elemento tem sua contribuição específica ao longo do processo de fabricação e confere ao produto final características próprias.

Tabela 5 - Especificação química das matérias primas para a fabricação de vidro plano (LUIZ, 1999)

Teores (%)	**Matérias-primas**					
	Areia industrial	**Barrilha**	**Dolomita**	**Calcário**	**Feldspato**	**Sulfato sódio**
Al_2O_3	0,0 7 ± 0,02	0,24 ± 0,21	0,21 ± 0,05	0,02 ± 0,02	17,91 ± 0,12	
CaO	0,005± 0,001		30,75 ± 0,24	55,50 ± 0,15		
Fe_2O_3	0,024± 0,010		0,171 ± 0,023	0,025 ± 0,009	0,135 ± 0,034	
K_2O					10,63 ± 0,14	
MgO	0,003 ± 0,01		20,65 ± 0,51	0,10 ± 0,02		
Na_2CO_3		99,4 ± 0,17				
Na_2O					3,06 ± 0,05	
$Na_2O + K_2O$					13,69 ± 0,14	
Na_2SO_4						99,21 ± 0,27
NaCl		0,44 ± 0,13				0,37 ± 0,17
P. Fogo	0,13 ± 0,03		47,03 ± 0,36	43,58 ± 0,18		
SiO_2	99,7 ± 0,04	0,0 ± 0,00	0,68 ± 0,17	0,30 ± 0,14	67,5 ± 0,44	
TiO_2	0,022 ± 0,003					

De uma forma genérica, Kogel *et al.*(2006) apresenta a composição química o vidro *float* com suas respectivas fontes de matérias-primas na Tabela 6.

Uma terceira exigência associada às duas primeiras é a regularidade de distribuição granulométrica e composição química. Um processo industrial será afetado com a variação nas matérias-primas, havendo perdas na qualidade e produtividade. Por tratar-se de matérias-primas naturais, para cada especificação química e granulométrica há uma tolerância que as indústrias poderão suportar sem afetar de forma significativa o seu rendimento.

Tabela 6 - Composição do vidro float - (KOGEL et al., 2006)

Óxido	Teores (%)	Fonte
SiO_2	71,5 - 73,2	areia de sílica
Na_2O	13,4 - 14,2	barrilha
CaO	8,4 - 8,9	calcita
MgO	3,6 - 4,3	dolomita
Al_2O_3	0,1 - 1,2	nefelina, feldspato
Fe_2O_3	0,08 - 0,12	óxido de ferro
SO_3	0,15 - 0,30	sulfato de sódio e sulfato de cálcio

Segundo Akerman (2000), do ponto de vista funcional, as matérias-primas são divididas nos seguintes grupos:

2.2.4.1 Vitrificantes

São matérias-primas portadoras de óxidos capazes de formar vidros e também são conhecidas como formadoras de rede. O principal vitrificante é a sílica, cujo maior representante é o quartzo.

Além da sílica, destacam-se os óxidos de boro, B_2O_3 e de fósforo P_2O_5. Os óxidos de boro são apresentados nas formas de Bórax pentahidratado, $Na_2B_4O_75H_2O$, bórax anidro, $Na_2B_4O_7$ e ácido bórico, H_3BO_3. O boro, além de vitrificante é um fundente enérgico. Utiliza-se este óxido associado à sílica e o vidro por ele produzido apresenta elevada resistência ao choque térmico. São utilizados em vidros refratários e vidros para uso em laboratórios.

Para fins específicos, devem ser mencionados o GeO_2, ZrO_2, In_2O_3, P_2O_3, Tl_2O_3, As_2O_5, Sb_2O_3, Bi_2O_3,V_2O_5,SO_3. Todos estes elementos formam vidros com os óxidos metálicos, dentro de certos limites de composição (SALMANG *et al.* 1962). Há também os halogênios, cujas forças de ligação são frágeis; como o BeF_2, AgCl,

AgBr, AgI, $PNCl_2$, $SnCl_2$, e $PbBr_2$.

Exceção feita à sílica, os demais elementos são direcionados para a fabricação de vidros especiais e sua parcela de contribuição na indústria de vidro é reduzida, atendendo a nichos específicos do mercado.

É possível fabricar-se vidro somente com sílica, porém sua temperatura de fusão é muito elevada e o custo de energia e dos refratários elevaria de forma significativa o custo do produto final.

2.2.4.2 Fluxantes ou fundentes

Os fluxantes ou fundentes são substâncias que tem o ponto de fusão bem inferior ao da sílica e a capacidade de reagir-se com ela, formando uma mistura com uma temperatura de fusão inferior ao da sílica pura.

Segundo Luiz (1999), a fusão das matérias-primas é uma sucessão de vários fenômenos físicos e químicos que se sobrepõe de acordo com o histórico de "tempo x temperatura" de cada elemento na composição. Há inicialmente a formação de uma massa líquida envolvendo os grãos dos elementos formadores de vidro, até então sólidos. Em seguida, ocorre um ataque químico dessa massa líquida a estes grãos, formando os silicatos.

O fundente mais utilizado é a barrilha[1] e a trona[2], um carbonato de sódio que tem como propriedades características o ponto de fusão de 851 °C e a densidade de 2,5 g/cm^3.

2.2.4.3 Estabilizantes

As matérias primas formadoras de vidro e os fundentes proporcionam um vidro um baixo custo de produção. O vidro assim produzido apresenta alta solubilidade e sem a estabilidade desejada. Os estabilizantes entram na composição do vidro para reduzir esta solubilidade e torná-lo inerte ao longo dos anos de uso e propiciarem elevadas resistências à flexão, à abrasão e ao choque térmico.

Os principais estabilizantes são os óxidos de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio, cujos representantes naturais são os feldspatos e nefelina, calcita e

---

[1] Barrilha – Carbonato de sódio produzido industrialmente. Ernest Solvay, químico belga, em 1861, desenvolveu o Processo Solvay ou Amônia-Soda, que utiliza como matérias primas o NaCl e $CaCO_3$ para a produção de barrilha; este processo pode ser resumido pela equação: $CaCO_3(s) + 2NaCl(s) \rightarrow Na_2CO_3(s) + CaCl_2(s)$ (www.solvay.pt)

[2] Trona - $Na_2CO_3.NaHCO_3.2H_2O$, (DANA, HURLBUT, 1976)

dolomita. Embora todos estes óxidos possam ser produzidos industrialmente, o baixo preço dos óxidos naturais faz com que estes sejam largamente utilizados em detrimento aos óxidos produzidos industrialmente.

O feldspato é o responsável pelo aporte de óxido de alumínio pertence à família dos silicatos e contém 18,5% de Al_2O_3, 65% de SiO_2 e 16,5% distribuídos entre álcalis e impurezas (DANA e HURLBUT, 1976). Ressalta-se que os álcalis são fundentes na composição do vidro. A alumina tem como função a redução do coeficiente de expansão, aumentando sua resistência à flexão, à abrasão e ao ataque de ácidos.

A calcita é um carbonato de cálcio e, quando pura, tem a composição de 56% de CaO e 44% de CO_2. O magnésio pode substituir o cálcio em pequenas quantidades. O cálcio, além de estabilizante é também um fundente, atuando na redução da viscosidade do vidro. Seu uso em excesso, aumenta a capacidade de devitrificação, propriedade indesejável ao processo. É utilizado nas indústrias de garrafas e nos vidros domésticos (DICKSON, 1951).

A dolomita, $CaMg(CO_3)_2$, é um carbonato de cálcio e magnésio com composição de 30,4% de CaO, 31,7% de MgO e 47,9% de CO_2 (DANA e HURLBUT, 1976). O magnésio tem efeito semelhante ao do cálcio. A dolomita normalmente é utilizada na fabricação de vidro devido às suas propriedades de agente fundente e estabilizante.

Os óxidos de chumbo e bário, PbO BaO, também são usados como estabilizantes. Suas elevadas densidades conferem ao vidro mais brilho devido à elevação do seu índice de refração. A utilização destes óxidos se faz em vidros óticos e nos "*cristais*".

2.2.4.4 Afinantes

Segundo Salmang *et al.* 1962 e Schneider Jr. (2000), os afinantes têm a função de homogeneizar o produto da fusão, que contém estrias ao longo de sua massa. O processo produtivo é facilitado quando se reduz a viscosidade da massa vítrea, de tal maneira a permitir a eliminação das bolhas de ar formadas no processo.

A ação dos afinantes pode ser definida como uma atividade de refino (LUIZ, 1999). Em uma determinada temperatura do processo, o afinante irá se evaporar ou se decompor em gases. Essa decomposição se dá de maneira rápida e os gases gerados formam bolhas que, com o aumento de volume chegarão à superfície e passarão à atmosfera. Durante a ascensão as bolhas maiores englobarão as bolhas menores, aumentando o seu volume e subindo mais facilmente. O movimento das

bolhas ajuda a homogeneizar quimicamente o vidro.

Os principais afinantes utilizados são sulfato de sódio, Na_2SO_4, sulfato de cálcio, $CaSO_4$ e o sulfato de bário, $BaSO_4$. A sua escolha é feita em função do componente que permanecerá no vidro, como Na_2O, CaO, ou BaO. Dentre estes, o sulfato de sódio é o mais utilizado.

Não há uma divisão rígida das funções de cada componente na fabricação do vidro. Os afinantes atuam também como fundentes e, além disso, aportam ao vidro os óxidos de suas composições.

2.2.4.5 Oxidantes e redutores

Os oxidantes têm a função de decompor qualquer substância orgânica presente na composição.

Tem-se como substâncias oxidantes o sulfato de sódio, Na_2SO_4, que também é utilizada no refino, apresentando uma dupla função na fabricação de vidro. Outro oxidante é o nitrato de sódio, $NaNO_3$, cujo efeito é semelhante ao do sulfato, porém age a temperaturas inferiores. Por esta razão, é empregado em fornos que trabalham com baixa temperatura (SCHNEIDER, 2000; DICKSON, 1951).

Os redutores propiciam condições específicas para o desenvolvimento de determinadas cores, uma vez que um mesmo óxido colorante, dependendo do estado de oxidação pode resultar em cores diferentes, ou ainda, colorir ou não. Os agentes redutores incluem todas as formas de carbono (DICKSON, 1951).

2.2.4.6 Colorantes

São substâncias responsáveis pela alteração da cor do vidro. Segundo Salmang *et al.* (1962), ao introduzir elementos colorantes no vidro, este irá gradualmente reduzir sua transparência. As cores se produzem devido à presença de íons que podem alcançar diferentes valências, como nos metais pesados. As cores são o resultado da emissão e absorção de luz nas camadas eletrônicas destes íons.

Na Tabela 7 são apresentadas as principais cores obtidas através dos elementos colorantes.

Tabela 7 - Elementos colorantes do vidro (DICKSON, 1951)

Cor	Agente colorante
Amarelo	Óxido de ferro, sulfeto de cádmio, cromatos de álcalis e compostos de urânio. O último apresenta uma fluorescência verde
Verde	Óxidos de ferro e cromo
Azul	Cobalto e sais de cobre.
Violeta	Níquel e sais de manganês
Âmbar	Ferro e manganês juntos, ou carbono e enxofre juntos
Preto	Altas concentrações de manganês com cobalto, cobre ou sais férricos
Rubi	Susp. coloidal de ouro, ou cobre, ou selênio com de sulfeto de cádmio

2.2.4.7 Descolorantes

As matérias-primas naturais estão sempre sujeitas a pequenas contaminações. Dentre as impurezas mais comuns está o óxido de ferro, fornecendo ao vidro uma cor esverdeada. Para reduzir o efeito destas impurezas, são adicionados outros elementos para reagir com estas, formando outra cor, cuja presença no produto tenha um efeito reduzido na alteração de sua coloração.

Os descolorantes habitualmente empregados são os óxidos selênio e o óxido de cobalto (DICKSON, 1951). Aumenta a cada ano a utilização de vidros reciclados, tendo como benefício uma redução de energia para sua fusão e como fator limitador a variedade de cores que afetarão o produto final. Para os vidros de cor verde e âmbar utiliza-se o óxido de zinco (ZnO) em proporções na ordem de 2% (VARNER, 2003).

2.2.4.8 Opacificantes

São as substâncias que reduzem a transparência dos vidros, dando a ele um aspecto de porcelana. São utilizados em vidros de mesa. O opacificante mais utilizado é o flúor e, por tratar-se de um elemento poluente, sua produção só é viabilizada em fornos elétricos. (AKERMAN, 2010).

2.2.5 Composição do vidro

Segundo Kogel, Trivedi *et al.* (2006), cada segmento da indústria do vidro tem sua

composição e dentro de cada segmento cada indústria escolhe sua própria formulação.

A escolha da composição das matérias primas para a fabricação do vidro é determinada a partir das propriedades que se deseja no produto final. Dentre essas propriedades, destacam-se as mecânicas, óticas, químicas, eletromagnéticas, elétricas e térmicas.

Os diversos segmentos de vidro com suas composições químicas podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química dos diferentes tipos de vidro (ZARZYCKI, 1991)

	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	ZnO	BaO	PbO	Al_2O_3	B_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	P_2O_5
Embalagens												
Metade do século XIX (garrafas)	4,7	0,90	20,5	5,4	-	-	-	4,4	-	62,5		
Metade do século XX (garrafas)	14,5	0,30	9,9	0,30				1,0		73,7		
Final do século XX	13,5	0,40	11,0	1,5				1,0		72,3		
Ampolas 1	9,0	3,0				6,5		9,0	8,0	64,5		
Ampolas 2	12,8	-	3,9	1,1	2,3	-	-	8,1	1,4	70,2		
Vidro plano (U.K)	13,0	0,60	8,4	3,9	-	-	-	1,0		72,6		
Forcault sheet	12,3	0,70	8,8	3,6				1,8		72,1		
Cristais												
U.K.	5,1	7,2					30,0	1,0		56,5		
Europa	1,0	14,9					24,0	0,10		60,0		
Pyrex	4,1	0,50	0,30	0,20				2,2	11,9	80,8		
Kavalier	7,6	7,7	7,4	0,30				0,60		76,4		
Vycor												
(fundido) as melted	6,6							3,6	26,9	62,7		
(após lixiviado) after leaching	0,20							0,80	4,0	95,0		
Lâmpadas												
Molibdênio	4,8	0,70	0,90			4,6		4,8	8,4	75,5		
Tungstênio	4,0	1,8						2,0	16,9	75,3		
Fibras												
Fibra de vidro (C-glass)	0,50		19,0	3,5				15,0	7,0	55,0		
Fibra textil	1,0		18,0	4,5				14,6	7,4	54,3		
Lã de vidro	3,5	1,1	10,4	10,3				13,0	0,0	45,6	15,5	
Fibra de vidro (E-glass)	8,5		14,0	3,0				4,0	5,0	65,0		
Lâmpadas incandescentes												
envelope	16,3	1,0	5,5	3,4		2,0		1,4		70,3		
pinch	12,9	0,90	0,40				22,6	0,50		61,8		
pinch	5,1	7,2					30,0	1,0		56,5		
Lâmpada de vapor de sódio												
inner coating	14,0		6,0					24,0	48,0	8,0		
inner coating	6,5		10,0					23,7	37,0	22,6		
inner coating			5,0			10,0		32,5	24,0			28,5
outer casing	15,0	1,0	6,4	3,7		2,3		1,5	0,5	69,1		

A composição química e o processo de produção do vidro determinarão

substancialmente suas propriedades. Além das propriedades técnicas o vidro deverá ter um custo que viabilize sua comercialização. Os principais custos de fabricação são as matérias-primas, energia térmica (gás ou elétrica), amortização dos investimentos e mão de obra. Grosso modo, estes quatro itens tem o mesmo peso na composição dos custos de fabricação.

2.2.6 Processos produtivos das matérias-primas naturais

As matérias-primas naturais na fabricação de vidro são areia industrial, feldspato, calcita e dolomita. Todos têm processos de beneficiamento que guardam semelhanças entre si. O beneficiamento pode compreender operações unitárias de cominuição e/ou classificação para se obter uma distribuição granulométrica adequada e de separação mineral reduzir os elementos contaminantes. Composição química, distribuição granulométrica, umidade e regularidade de fornecimento determinam a qualidade de cada matéria prima.

2.2.6.1 Areia industrial

A denominação areia refere-se à classificação de acordo com o tamanho dos fragmentos de rocha. Dentre as diferentes classificações, duas podem ser observadas na Tabela 9, onde podem ser observadas classificações distintas para uma mesma faixa granulométrica.

Tabela 9 - Classificação granulométrica de areia

Denominação	**Faixa granulométrica (mm)**	
	ABNT[1] (NBR 7211/83)	**Escala de Wentworth[2]**
Muito fina	+0,1 - 0,6	+0,062 - 0,125
Fina	+0,6 – 1,2	+0,125 -0,25
Média	+1,2 - 2,4	+0,25 -0,50
Grossa	+2,4 - 4,8	+0,50 -1,0
Muito grossa	-	+1,0 - 2,0

Segundo Luz e Lins (2005) areia é um material com granulometria entre 0,5 e 0,1

[1] ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

[2] Escala de Wentworth: escala logarítmica de classificação granulométrica (diâmetro maior) dos fragmentos de sedimentos clásticos ou detríticos, criado em 1922 por C. K. Wentworth. Esta escala é bastante utilizada pelos geólogos e a sua classificação geralmente difere um pouco daquelas feitas pelos engenheiros.(http://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Wentworth)

mm resultante de desagregação natural ou cominuição de rochas. Tem as denominações de areia industrial, areia de quartzo ou quartzosa ou areia de sílica quando apresentam elevado teor de sílica, SiO_2. É o componente com maior participação em massa na fabricação da quase totalidade dos vidros.

A areia industrial tem como atributos sua composição física e química, enquanto para a construção civil os principais atributos são suas características físicas. Concentra na região da Depressão Periférica Paulista, na Baixada Santista e no litoral sul do Estado de São Paulo o maior volume de produção deste bem mineral. Estima-se que a produção brasileira foi 3,1 milhões de toneladas em 2000 (LUZ e LINS, 2005).

Os municípios produtores são Descalvado, Analândia, Rio Claro, São Pedro, no Estado de São Paulo, Viamão, no Rio Grande do Sul, Araquari e Jaguaruna e Imbituba em Santa Catarina. No Estado Paraná destaca-se os municípios de Campo Largo e Lapa. As maiores empresas produtoras são a Mineração Jundu, Mineração Descalvado e Sibelco.

Em abril de 2009, a Mineração Jundu iniciou as obras para sua nova mina em Guararema (SP), para produzir 800 mil t/ano de minério bruto. Após o beneficiamento parte deste montante será areia industrial, que tem como objetivo atender ao mercado vidreiro do Vale do Paraíba e capital paulista (BRASIL MINERAL, 2009).

Várias são as modalidades de lavra para a explotação de areia industrial. Em depósitos de areia não consolidada, de camadas inferiores a 6 m e com água abundante a lavra é feita por dragas flutuantes. Consiste na sucção e transporte da areia por tubulações até o local de beneficiamento.

Para depósitos de areia medianamente consolidadas e espessura superior a 6 m, são realizados desmonte hidráulicos com ou sem auxílio de escavadeiras. Por gravidade a polpa é transportada até a draga, onde é bombeada até o local de beneficiamento. Não havendo água em abundância, a lavra é feita com escavadeira hidráulica ou pás-carregadeiras e o transporte até o beneficiamento é feito por caminhões basculantes.

Em caso de quartzitos duros o desmonte é feito com explosivos, carregamento com pás-carregadeiras ou escavadeiras hidráulicas e o transporte até o beneficiamento é feito por caminhões basculantes.

Nestas modalidades se encaixam a grande maioria lavras de areia industrial.

O beneficiamento tem como objetivo remover os elementos deletérios e a adequar a granulometria para o uso. Usa-se o peneiramento para eliminar a fração grosseira e hidrociclonagem para eliminar os finos. O material retido na peneira, areia grossa, é destinado à construção civil e o *overflow* dos hidrociclones é destinado à barragem de rejeitos.

Os elementos deletérios, em geral os minerais portadores de Fe_2O_3, são removidos por separação magnética de alta intensidade e/ou concentração densitária. Para usos mais nobres, pode ser usada até flotação (LUZ e LINS, 2005).

Descrito por Almeida *et al.* (2004), o fluxograma para a produção de areia industrial da Mineração Descalvado é mostrado na Figura 12.

,

Figura 12 - Fluxograma de produção de areia industrial da Mineração Descalvado, adaptado de (ALMEIDA et al., 2004)

2.2.6.2 Dolomita e calcita

São minerais abundantes na natureza e tem funções diversas em vários segmentos industriais. Cimento, cal, indústria de plásticos, corretivo de solo, produção de carbonato de cálcio precipitado, fundentes na siderurgia, são os usos mais comuns. No vidro, são responsáveis pelo aporte de MgO e CaO e tem a dupla função de fundente e estabilizante.

Para a indústria de vidro o beneficiamento consiste na cominuição para adequar sua granulometria à alimentação do forno. Esta granulometria que é variável de 600 a 100 μm. A cominuição é feita através de britagem primária, rebritagem, moagem em moinhos de martelos ou pendulares e classificação granulométrica em aerosseparadores.

2.2.6.3 Feldspato

Denomina-se feldspato o grupo de minerais constituídos de aluminossilicatos de potássio, sódio e cálcio (LUZ e COELHO, 2004). Tem a tripla função na composição dos vidros, fornecendo o vitrificante, SiO_2, o estabilizante, Al_2O_3 e os fundentes, K_2O e Na_2O. Além de sua utilização na fabricação de vidro, são também utilizados no mercado cerâmico na produção de esmaltes e massas.

O processo de produção de feldspato a partir dos pegmatitos está representado na *Figura* 13.

O beneficiamento do feldspato compreende em cominuição e separação dos elementos deletérios, geralmente minerais portadores de Fe_2O_3, que são eliminados através de separação magnética e/ou flotação.

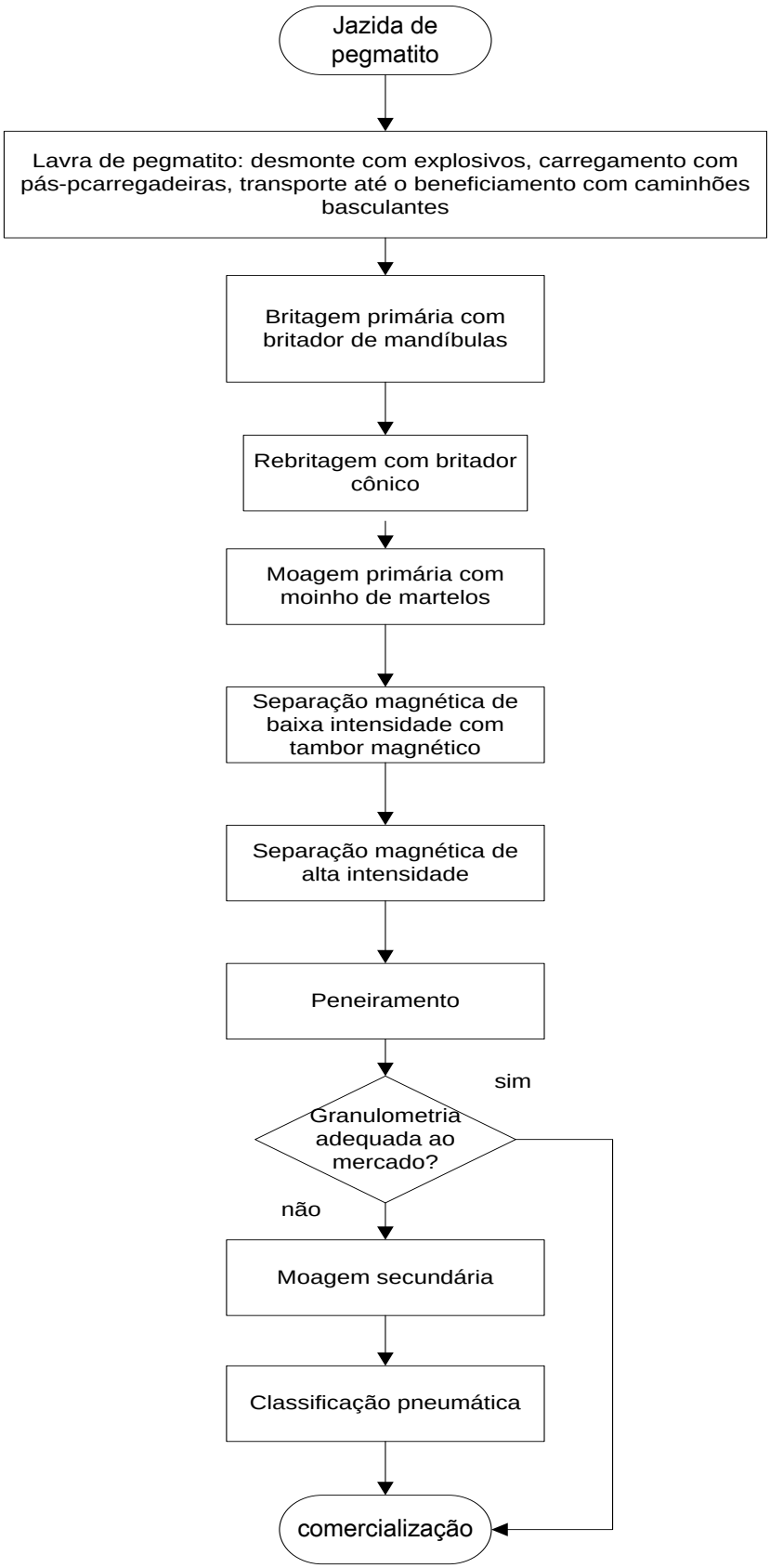


Figura ***13 - Fluxograma de produção de feldspato a partir de pegmatitos - adaptado (BARBA, et al, 1997)***

Os feldspatos têm diferentes composições químicas e podem ser classificados conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Composição química dos feldspatos (% em massa); (BARBA, FELIU et al., 1997)

		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
Feldspato potássico	A	64,8	18,4					16,9
	B	65,5	18,8	0,20	0,43		3,2	11,8
Feldspato sódico	C	68,7	19,5				11,82	
	D	66,3	19,8	0,16	2,43		7,80	3,63
Nefelina	E	41,3	34,9				15,91	8,06
	F	43,0	34,0	0,14	0,36	0,04	15,42	6,15

Notas: A: ortoclásio; C: albita; E: nefelina; B, D e F: feldspatos comerciais

Há uma grande variedade de feldspatos comercializados, cuja composição química difere da acima apresentada, porém mantém as proporções entre os fundentes, sílica e alumina.

2.2.6.4 Areia feldspática

Areias de diferentes formações podem conter quantidades apreciáveis de feldspato e serem aproveitadas economicamente. Segundo Luz e Coelho (2004), nos municípios de Seropédica e de Itaguaí (RJ) há depósitos de areia contendo 25% de feldspatos potássicos e sódicos, com teores de 4,25% de K_2O e 1,56% de Na_2O. Segundo o autor, estes materiais estão sendo estudados para o aproveitamento nas indústrias de vidro e cerâmica.

2.3 A elaboração de vidro

Segundo Akerman (2000), elaborar um vidro é misturar matérias-primas diversas em quantidades pré-estabelecidas e levá-las ao forno para a fusão. O processo de elaboração termina quando se inicia a conformação, etapa que dará ao vidro sua forma final. Toda matéria-prima que entra na composição fará parte do vidro, influenciando suas características.

A correta formulação da composição condicionará ao vidro as propriedades desejadas ao produto final. O projeto e detalhes construtivos do forno, a escolha do combustível a ser utilizado e a gestão de cada etapa do processo afetarão de forma

significativa o custo de produção. A viscosidade, que é função da formulação de matérias-primas e da temperatura do forno, influenciará no processo produtivo e na qualidade final do produto.

O fluxograma de produção de vidro é apresentado na Figura 14.

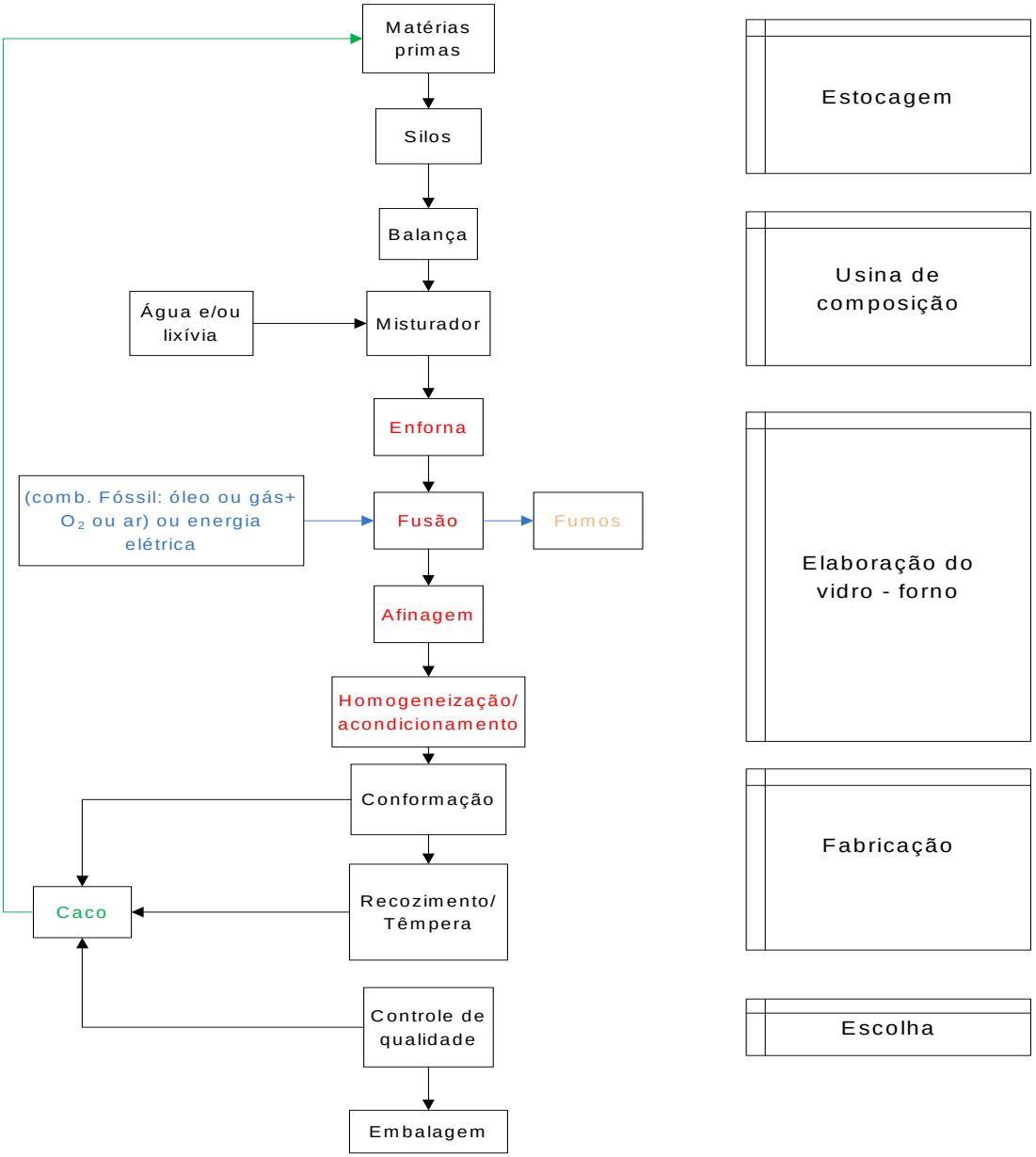


Figura 14 - Fluxograma de produção de vidro. Modificado. (AKERMAN, 2000)

O fabricante especifica as matérias primas em função de sua composição química, granulométrica e dos índices toleráveis dos elementos contaminantes. Esses contaminantes são em geral representados pelos minerais que contém Fe_2O_3, que alteram a cor e dos infundíveis que apresentarão defeitos no produto final.

A escolha dos fornecedores é feita em função da qualidade intrínseca da matéria-prima, do preço de venda, da distância da mina em relação à fábrica e da capacidade de fornecimento do minerador. Entende-se como capacidade de fornecimento a confiabilidade das pesquisas realizadas na jazida, nas competências técnicas e organização administrativa da mineradora.

De acordo com Zarzycki (1991), a produção de vidro é um processo contínuo em que ocorrem reações químicas entre as matérias-primas em alta temperatura. A ação da temperatura sobre os elementos fundentes os liquefaz e, uma vez líquidos, envolvem as partículas sólidas, que provocam as sucessivas reações até se tornar uma única massa líquida. As reações na elaboração de um vidro acontecem nesta ordem:

- $Na_2CO_3 + SiO_2 \rightarrow Na_2SiO_3 + CO_2\uparrow + \Delta H_1$
- $Na_2SiO_3 + SiO_2 \rightarrow Na_2Si_2O_5 + \Delta H_2$
- $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow \Delta H_3$
- $CaO + SiO_2 \rightarrow CaSiO_3 + \Delta H_4$

A temperatura para a fabricação dos diferentes tipos varia de 1400^0C até 1600^0C. A energia cedida aos fornos pode ser elétrica, óleo ou gás (combustíveis fósseis). Por razões econômicas e estratégicas, utiliza-se no Brasil o gás natural.

O processo de fabricação de vidros pode ser intermitente ou contínuo. Os intermitentes são destinados aos vidros especiais, como óticos ou oftálmicos, em que geralmente se produz em bateladas diárias. Os contínuos são utilizados para a produção em larga escala. O sistema de produção contínuo está representado na Figura 15.

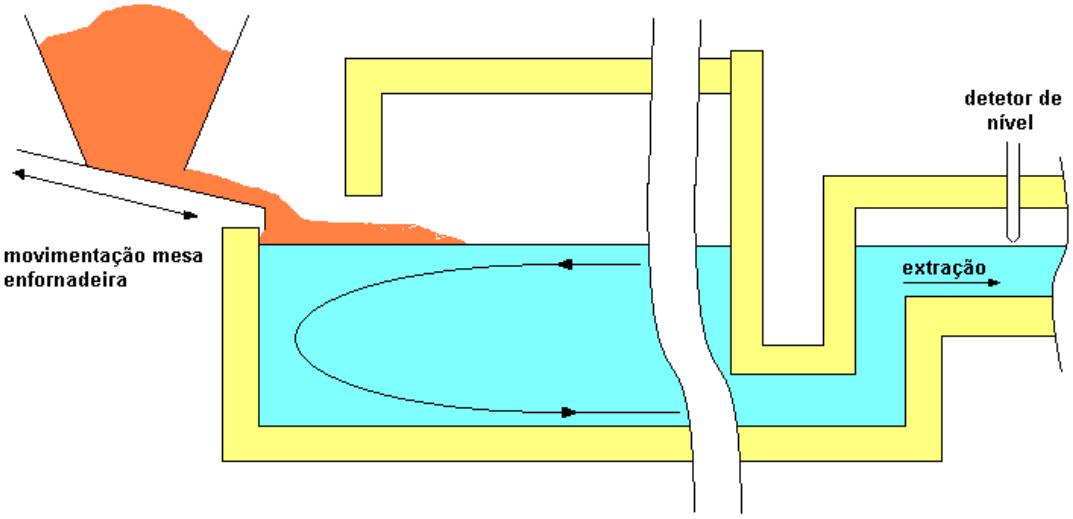


Figura 15 - Sistema de produção contínua de vidro (AKERMAN, 2000).

O fluxo contínuo de matérias-primas alimenta o banho extraído na mesma taxa[1] de alimentação para alimentar as máquinas de conformação. Akerman (2000) denomina a fase de fusão como elaboração e a fase de conformação como fabricação.

[1] Há uma perda sob forma de gases da decomposição dos sulfatos e carbonatos presentes nas matérias primas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos compreenderam em amostragem de lotes comerciais de areia em fase de produção ou comercialização, seguido da realização de análises granulométricas, químicas e mineralógicas, com o objetivo de caracterizá-la e avaliar o seu potencial de utilização como matéria prima para vidros.

Segundo Kahn e Sant'Agostinho (1997), parâmetros essenciais na caracterização de matérias-primas minerais são a identificação das fases, suas respectivas composições químicas, as formas de associações minerais e inclusões, impregnações, recobrimento superficial, seu estado de alteração e o grau de liberação.

Segundo esses autores, a caracterização tecnológica é realizada através de uma seqüência de ensaios e análises laboratoriais segundo critérios específicos e é direcionada em função do bem mineral principal e dos elementos deletérios presentes. Estas separações minerais se fazem baseadas nas diferentes propriedades físicas de cada mineral e no tamanho das partículas.

3.1 Amostragem

De acordo com Sampaio e Tavares (2005), amostragem é a operação de remoção de uma parte conveniente de um grande volume, de tal maneira que esta amostra represente fielmente todas as propriedades do lote ou parte de uma jazida em questão. A amostragem poderá ser primária, quando retirada diretamente do lote ou secundária, quando a amostra primária é fracionada para diferentes estudos.

Para que se tenha uma amostra representativa, faz-se necessário um plano de amostragem que contemple o tipo de material, tamanho e características do lote, jazida ou fluxo de produção. Poderá ser sistemática, quando for feita uma retirada em intervalos de tempo ou espaço regulares; aleatória, quando retiradas sem uma regularidade prevista, desde que todas as partes do material tenham a mesma oportunidade de serem selecionados. Poderá ainda ser estratificada, quando o material se apresenta em classes diferentes entre si.

Para determinar a massa a ser amostrada, foram utilizados tabelamentos empíricos os quais indicaram a coleta de um mínimo de 5 kg de material, segundo a tabela Richards. Foi também levado em consideração que, ao longo do trabalho, uma

mesma amostra seria submetida a diferentes ensaios e, se necessário fosse, determinados ensaios deveriam ser repetidos. Por esta razão, decidiu-se pela coleta de 50 kg de cada amostra a ser estudada.

3.1.1 Seleção das áreas objeto de amostragem

Frente à grande extensão considerada e aos custos para uma ampla campanha de amostragem, assim como o caráter exploratório do presente estudo, os locais de amostragem foram definidos com base na localização das principais unidades produtoras da região.

A primeira etapa foi definir as mineradoras de onde se coletariam as amostras. Dois critérios foram utilizados, o primeiro, geográfico, procurando afastar os pontos de coleta da amostra e, o segundo, concentrando os pontos de amostragens nas empresas de maior representatividade em termos de volume de produção.

Foram selecionados sete lotes de produção de três grandes mineradoras localizadas nos municípios de Tremembé, Taubaté e Jacareí. A soma da produção destas empresas ultrapassa 1,8 milhões de toneladas por ano, o que corresponde a 25% da areia produzida na região.

Caso fosse realizada a amostragem da areia in natura, na frente de lavra, cavas submersas ou através de sondagens ao longo das jazidas, os resultados seriam distintos, principalmente no que tange à distribuição granulométrica e demais características.

A amostragem de campo seguiu o roteiro que pode ser resumido na Figura 16.

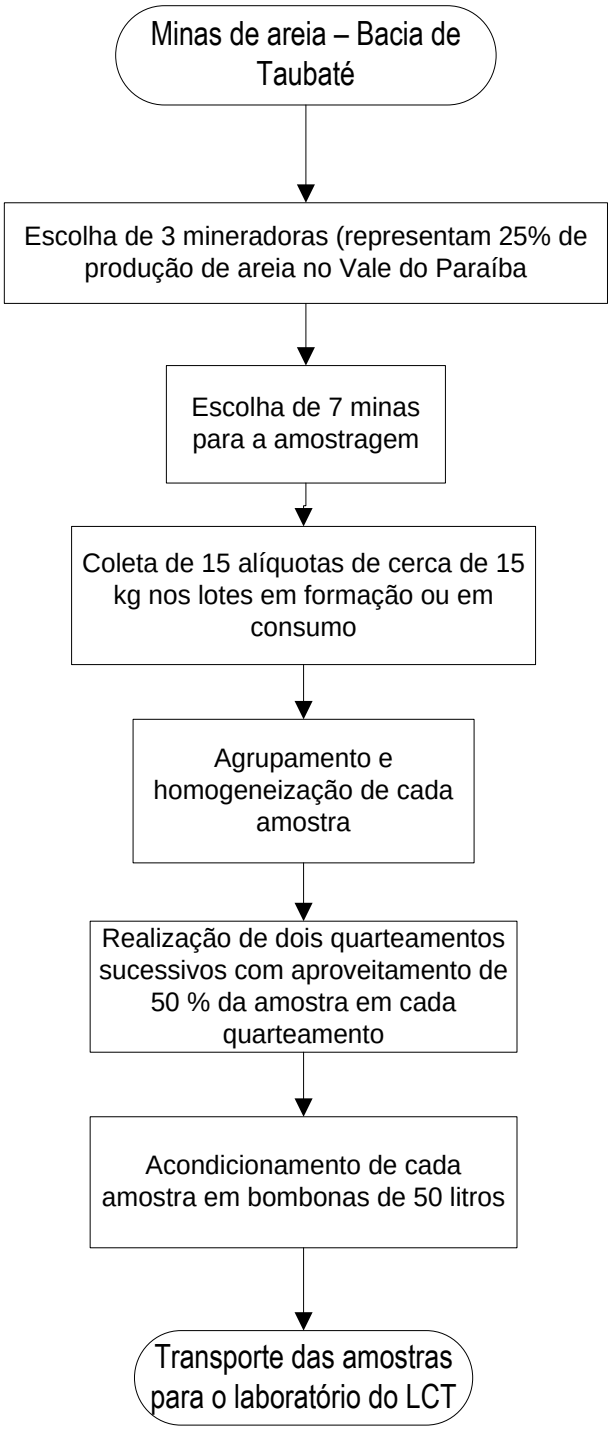


Figura 16 - Fluxograma de amostragem

Os pontos de amostragem considerados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Pontos de coleta de cada uma das amostras estudadas

Amostra	*Empresa/local*	*Coordenadas geográficas*		*Município*
		S	*W*	
1	PA Tubarão (Cajamar)	22^0 58’ 04.3”	45^0 36’ 14.4”	Tremembé
2	PA Tubarão (Cajamar)	23^0 00’ 23,9”	45^0 38’ 31.2”	Taubaté
3	PA Tubarão (Quiririm I)	23^0 01’ 35.0”	45^0 38’ 54.8”	Taubaté
4	PA Tubarão (Quiririm II)	23^0 08’ 00.6”	45^0 44’ 55.7”	Taubaté
5	Oásis Mineração (fina)	$23^0$16’ 10.9”	$45^0$57’ 42.4”	Jacareí
6	Oásis Mineração (grossa)	$23^0$16’ 10.8”	$45^0$57’ 42.6”	Jacareí
7	Porto Brasil	$23^0$16’ 27.7”	45^0 59’ 19.2”	Jacareí

3.1.2 Descrição da amostragem

Cada ponto/local de amostragem corresponde a pilhas de areia com dimensões variadas, representando de 200 a 500 t.

A amostragem foi sistemática e seguiu os seguintes passos: para cada lote com geometria semelhante à Fotografia 7, percorreu-se em um caminho ascendente em forma de espiral, coletando-se 15 alíquotas de aproximadamente 15 kg cada da base ao topo, como apresentado na Fotografia 8.

Fotografia 7 - Lote de areia em formação

Fotografia 8 - Coleta de uma alíquota de lote de areia formado por hidrociclonagem

Cada uma das 15 alíquotas foi depositada sobre uma lona conforme apresentado na Fotografia 9 e foram homogeneizadas com sucessivos arrastes da lona para os vértices diametralmente opostos, remontando-as sobre outras, formando uma pilha cônica. Esta pilha foi seccionada em quatro quadrantes a partir de seu vértice por uma placa de compensado. Feita esta operação, foram compostos dois dos

quadrantes diametralmente opostos (Fotografia 10) e descartados os demais; esta operação foi mais uma vez repetida até atingir uma massa aproximada de 50 kg

Fotografia 9 - Distribuição das alíquotas sobre uma lona para a posterior homogeneização

Fotografia 10 - Redução da alíquota através do quarteamento da pilha

Ao final da coleta, estas amostras foram acondicionadas em bombonas de plástico, identificadas e transportadas para os laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

3.2 Caracterização preliminar e seleção de amostra para estudo detalhado

A caracterização prévia teve como objetivo identificar qual ou quais das amostras se apresentavam mais adequadas como matéria-prima na fabricação de vidros planos. Uma vez identificada uma ou mais com tais características, os estudos de caracterização foram aprofundados.

Os trabalhos de caracterização preliminar seguiram o roteiro da Figura 17.

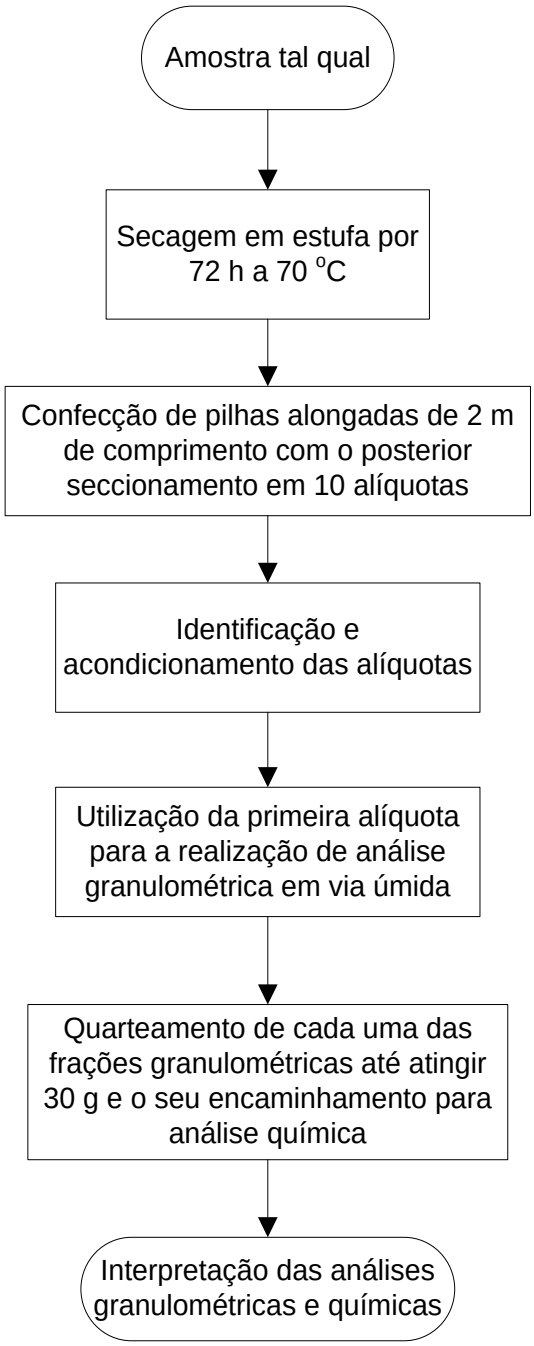


Figura 17 - Fluxograma dos trabalhos de caracterização preliminar

3.2.1 Preparação das amostras

A secagem foi feita em estufa elétrica a temperatura de 70^{0}C durante 72 h até a completa massa constante. Retiradas e resfriadas, cada amostra foi homogeneizada em pilha alongada de seção triangular (Fotografia 11) e seccionada transversalmente ao seu eixo, dividindo-a em dez alíquotas iguais (Figura 18).

Fotografia 11 - Pilha alongada de uma amostra de 50 kg

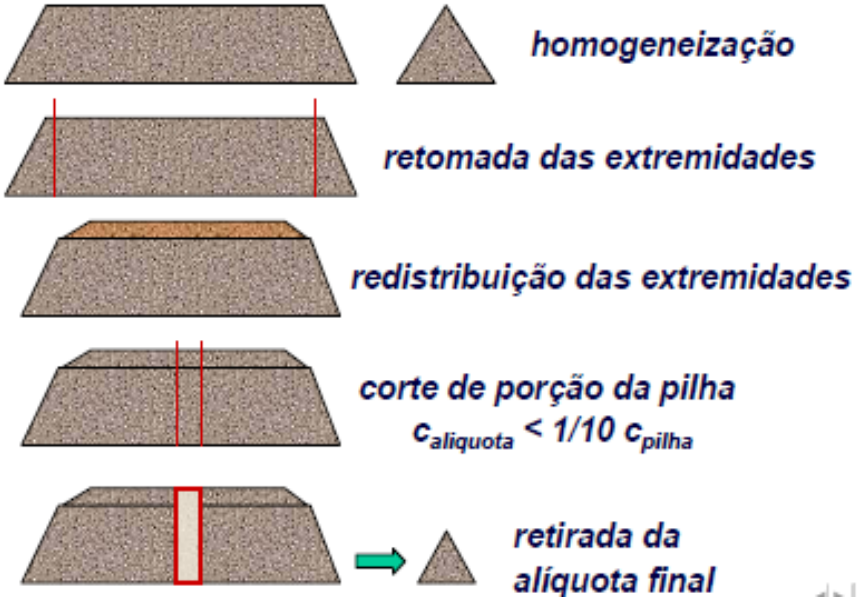


Figura 18 - Procedimento adotado para a formação da pilha e tomada de alíquotas (Kahn, H)

3.2.2 Análise granulométrica

Segundo Kahn e Sant'Agostinho (1997), a escolha do método para a determinação do tamanho das partículas é realizada em função do seu tamanho e da necessidade ou não de fracionamento da amostra para análises/ensaios posteriores.

Neste estudo, foi empregada uma alíquota de 5 kg de cada amostra para análise granulométrica por peneiramento em via úmida. Foram utilizadas as peneiras com aberturas de 4,78 mm; 2,38 mm; 1,41 mm; 0,60 mm; 0,42 mm; 0,30 mm; 0,21 mm; 0,15 mm; 0,105 mm e 0,074 mm (respectivamente, 4, 8, 14, 28, 35, 48, 65, 100, 150

e 200 malhas Tyler; Fotografia 12).

A operação foi manual, o material retido foi secado na estufa por 48 h à temperatura de 70^0C. Cada fração foi pesada, identificada e acondicionada para posteriores trabalhos.

Fotografia 12 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica

3.2.3 Análise química

Análise química foi empregada para quantificar os principais óxidos presentes em cada amostra. O método empregado foi a espectrometria por fluorescência de raios X (FRX), com determinações sistemáticas de SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, MnO, TiO_2, P_2O_5 através de espectrômetro Axios Advanced, marca PANalytical. Perda ao fogo foi efetuada por calcinação da amostra a 1050ºC por uma hora.

Para adequação de massa para análises químicas das amostras tal qual e das frações granulométricas obtidas foi utilizado o quarteador Jones (Fotografia 13 e Figura 19) com a retirada de alíquotas da ordem de 30 g para as análises.

Fotografia 13 - Quarteador Jones (autor: Kahn, H)

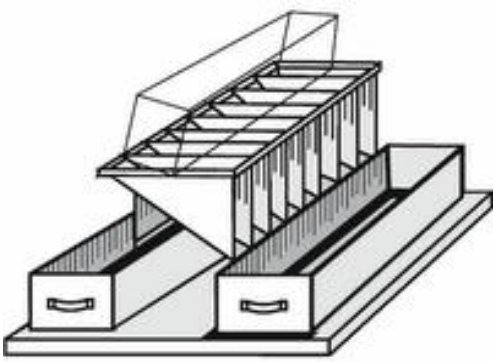


Figura 19 - Quarteador Jones (autor: Kahn, H)

3.3 Caracterização detalhada

Das sete amostras iniciais apenas uma apresentou características mais apropriadas para a fabricação de vidros. A amostra 5 foi objeto de estudos mais detalhados com o objetivo de avaliar suas principais características.

Inicialmente, realizaram-se ensaios de atrição seguidos de análise granulométrica para avaliar as possibilidades de minimizar os teores de óxidos de ferro. Posteriormente, na fração granulométrica de interesse foram efetuados ensaios de separações magnéticas para verificar as possibilidades de minimizar os teores dessas substâncias e separações minerais para auxiliar na identificação e avaliar o conteúdo relativo dos minerais presentes.

A identificação dos minerais presentes foi feita a partir das análises químicas e da conjugação das análises dos microscópios estereoscópicos, difração de raios X (método RIR) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As análises feitas no MEV permitiram avaliar ainda a forma de ocorrência dos contaminantes remanescentes.

3.3.1 Atrição e separação magnética

3.3.1.1 Atrição

A atrição é uma operação em via úmida em que a polpa é movimentada por um sistema de pás em um recipiente fazendo com que as partículas se choquem umas às outras com o objetivo de remover as contaminações superficiais, em geral substâncias argilo-ferruginosas.

Esta operação foi realizada em uma célula de atrição Denver, modelo D12, com cuba de seção quadrada de 90 mm de lado e altura de 153 mm. Dividiu-se uma alíquota de 5,7 kg em 10 sub-alíquotas; cada qual atricionada por 6 minutos, a uma concentração com 60% de sólidos, rotação 1.800 rpm. Não foi utilizado nenhum reagente químico nesta etapa.

Concluída a operação, a amostra foi peneirada a úmido nas malhas 0,60 mm e 0,105 mm de abertura e somente na fração -0,60+0,105 mm foi utilizada para realização de análises químicas e demais ensaios. As frações maiores que 0,60 mm e menores que 0,105 mm foram desconsideradas por terem uma granulometria inadequada para a fabricação de vidro.

3.3.1.2 Separação magnética

Susceptibilidade magnética é propriedade que faz com que determinada substância possa ser atraída ou repelida na presença de um campo magnético. Quando submetido a uma força magnética, os materiais apresentam comportamentos diversos e por essa razão são classificados em três grupos: *magnéticos* são fortemente atraídos, *paramagnéticos* são fracamente atraídos *e diamagnéticos*, fracamente repelidos (ARRUNATEGUI, 1980).

Ensaios de separação magnética foram efetuados para a fração -0,60 +0,105 mm com e sem prévia atrição para fins comparativos. Foi utilizado um separador eletromagnético de alta intensidade via úmida, modelo L4, Inbras-Eriez (WHIMS - *wet higth intensity magnetic separator)* com uma corrente de 15 A, que equivale a uma intensidade de campo magnético de 8,5 kG sem matriz, representado na Fotografia 14. Nos ensaios efetuados empregou-se matriz de tela expandida fina.

Fotografia 14 - Separador magnético de alta intensidade via úmida Modelo L4, Inbrás-Eriez

3.3.1.3 Caracterização dos produtos de separação magnética

A caracterização do produto não magnético teve como objetivo identificar e quantificar os contaminantes presentes, sua forma de ocorrência e associação com as fases de interesse. Da mesma forma, os produtos magnéticos foram também caracterizados.

As técnicas empregadas para caracterização dos produtos de separações magnéticas foram a difratometria de raios X e a microscopia eletrônica de varredura.

A difração de raios X (DRX) é uma técnica instrumental que permite a identificação de fases cristalinas, análise quantitativa das fases presentes, o cálculo das dimensões da cela unitária, determinação da cristalinidade, dentre outras propriedade de materiais cristalinos (BISH e REYNOLDS, 1989). As análises mineralógicas por DRX através do método do pó foram efetuadas utilizando-se um difratômetro MPD 1880, marca Philips, com tubo de cobre (Cu Kα) foco largo em condições de 40 kV e 50 mA. A faixa angular de operação foi de 2 a 70º 2θ, com passo de 0,02º de 2θ e o tempo de 2 segundos por passo.

As fases minerais presentes foram identificadas através do programa X'Pert Highscore da Panalytical, utilizando o banco de dados PDF-2 do International Centre for Diffraction Data (ICDD) com base de dados atualizada até 2003. A estimativa do

conteúdo destas fases foi efetuada através do método RIR (*reference intensity ratio* - análise semi-quantitativa).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é a técnica na qual a interação de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área ou o microvolume a ser analisado gera uma série de fenômenos. Podem ser utilizados para caracterizar propriedades da amostra, tais como composição, superfície topográfica, cristalografia, dentre outros. Os sinais de maior interesse referem-se, usualmente, às imagens de elétrons secundários e de elétrons retroespalhados, ao passo que na microssonda eletrônica o sinal de maior interesse corresponde aos raios X característico, resultante do bombardeamento do feixe de elétrons sobre a amostra, permitindo a definição qualitativa ou quantitativa dos elementos químicos presentes em um microvolume mediante utilização de espectrômetros por fluorescência de raios X, particularmente por energia dispersiva (EDS) (GOLDSTEIN et al, 2003).

Observações ao MEV/EDS foram empregadas na caracterização dos minerais magnéticos em montagem de partículas sobre fita de carbono e do não magnético em seções polidas para avaliação da forma de ocorrência e associações dos contaminantes remanescentes.

Foi empregado microscópio eletrônico de varredura ambiental (ESEM) Quanta 600, marca FEI, com sistema de microanálise por EDS Esprit/Quantax4030, marca Bruker na análise de seções polidas e microscópio eletrônico de varredura Stereoscan LEO 440, marca LEO, com sistema de microanálise por EDS, INCA, marca Oxford na avaliação de montagem de partículas/grãos.

3.3.2 Caracterização dos minerais pesados

Uma nova alíquota desta mesma amostra, com massa da ordem de 30 kg, foi submetida a uma seqüência de operações de separações minerais com o objetivo de identificar e quantificar os minerais pesados, conforme fluxograma apresentado na Figura 20,

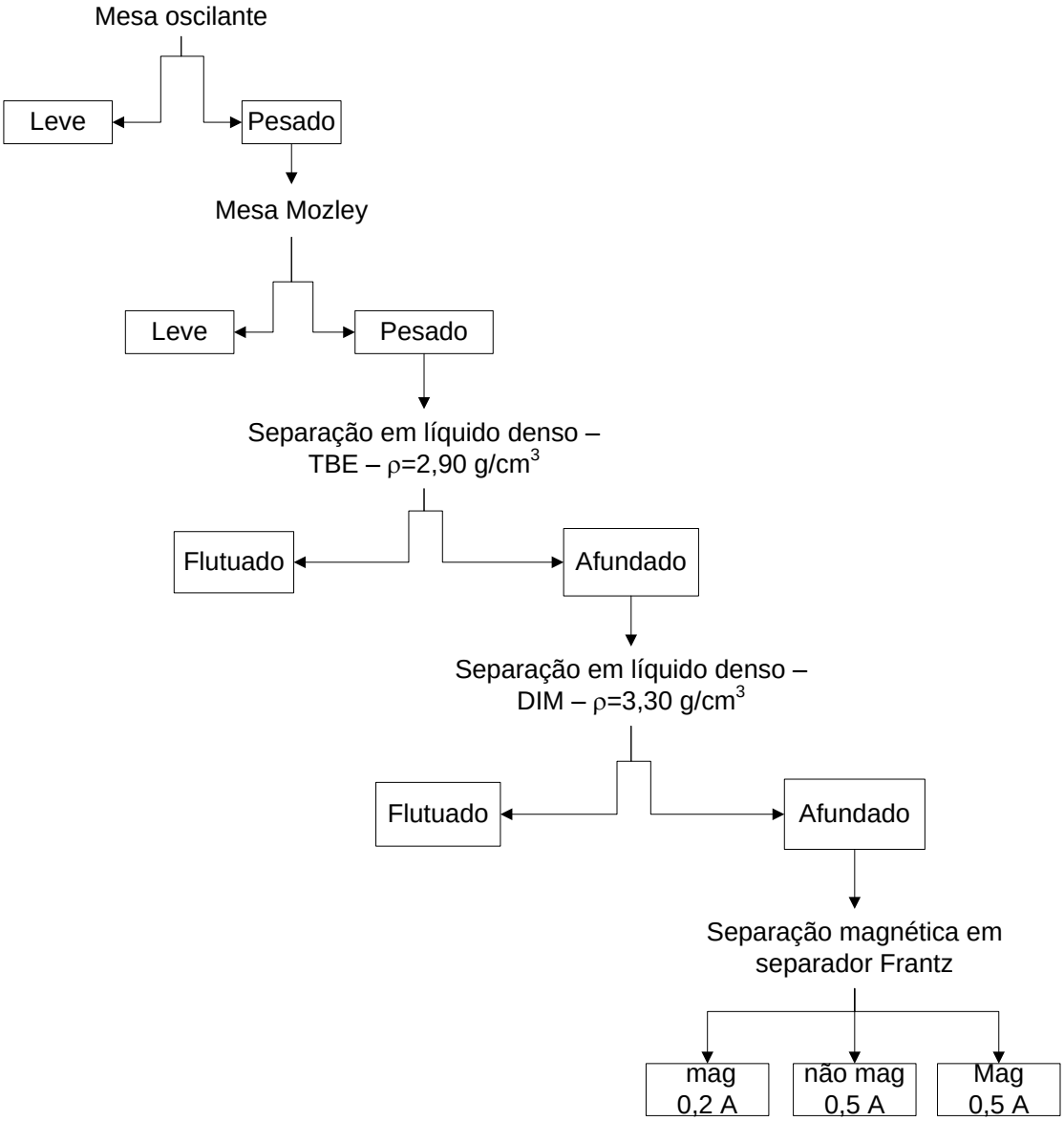


Figura 20 - Fluxograma dos ensaios de separações minerais

3.3.2.1 Concentração em mesa oscilante

Mesas oscilantes ou oscilatórias são equipamentos que operam em via úmida, com polpas diluídas e alimentação contínua. Um movimento oscilatório de 200 a 300 pulsações por minuto, com amplitude de 1” a ½” e uma leve inclinação, proporcionam uma separação entre partículas leves e pesadas. As variáveis de operação são o ângulo de inclinação da mesa, amplitude e frequência das oscilações. (ARRUNÁTEGUI, 1980).

Neste trabalho, foram processados cerca de 30 kg de amostra em mesa concentradora marca Wilfley, com uma concentração de sólidos de 11%, frequência

de 513 pulsações por minuto e uma amplitude de 6 mm. O objetivo da separação foi o de se efetuar uma pré-concentração de modo a gerar um produto leve e isento de minerais pesados, conforme mostrado na Fotografia 15 e Fotografia 16

Fotografia 15 - Mesa oscilatória – alimentação de sólido + água

Fotografia 16 - Mesa oscilatória – saída de minerais leves e pesados

3.3.2.2 Concentração em mesa Mozley

Mesa Mozley, Fotografia 17, é um equipamento que opera em via úmida e promove a separação de minerais de diferentes densidades. Este equipamento reproduz os efeitos de concentração de uma bateia com movimentos oscilatórios aplicados a uma a polpa diluída. Sua operação apresenta imperfeições operacionais e por esta razão, em estudos de caracterização, é mais utilizada para redução de massa de amostras, requerendo em seguida outros métodos de separação (KAHN et al, op cit).

Fotografia 17 - Mesa Mozley (autor Kahn, H)

O pré-concentrado de pesados da mesa oscilante foi processado em mesa Mozley também no intuito de pré-concentrar os minerais pesados para estudos posteriores.

3.3.2.3 Separação em líquidos densos

Sampaio e Tavares (2005) definem como ensaio de afunda-flutua a separação de um material em frações densimétricas com densidades definidas. Este princípio é empregado tanto em atividades industriais quanto em laboratório. Consiste em utilizar uma suspensão líquida de densidade intermediária à de dois ou mais minerais que se desejam separar. Flutuarão os de densidade inferior ao do meio e afundarão os de densidade superior ao líquido denso.

Líquidos orgânicos são os mais utilizados em laboratórios e soluções aquosas de alta densidade, como ferro-silício, para separações em escala industrial.

O pré-concentrado de pesados obtido em mesa Mozley foi, na sequência, objeto de separações minerais para a concentração e caracterização dos minerais pesados.

Nas separações minerais em líquidos densos foram utilizados o tetra-bromo-etano ($CHBr_2CHBr_2$), de densidade 2,9 g/cm^3, e o di-iodeto de metileno (CH_2I_2), de densidade 3,3 g/cm^3 (Fotografia 18).

Fotografia 18 - Separação em líquido denso (funil)

3.3.2.4 Separador magnético Frantz

Os minerais pesados obtidos nas separações em líquidos densos foram submetidos a separações eletromagnéticas em separador Frantz de barreiras (Fotografia 19) com intensidades de corrente de 0,2 A e 0,5 A para posterior identificação dos minerais pesados.

Fotografia 19 - Separador magnético Frantz com barreiras (autor Kahn, H)

3.3.2.5 Identificação dos minerais

A identificação dos minerais presentes foi feita a partir da conjugação de observações ao microscópio estereoscópico, análises químicas feitas por espectrometria por fluorescência de raios X (FRX), difratometria de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Caracterização preliminar e seleção de amostra(s) para detalhamento

4.1.1 Composição química

Os resultados de composição química das amostras estudadas estão representados na Tabela 12.

Tabela 12 - Composição química das amostras estudadas (% em massa)

Amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	PF
AM 01	93,9	3,11	0,36	0,05	<0,01	<0,01	1,75	0,25	0,04	0,03	0,55
AM 02	93,4	3,18	0,37	0,13	<0,01	0,05	1,68	0,14	0,03	0,03	0,55
AM 03	94,1	3,06	0,20	0,11	<0,01	0,04	1,61	0,12	0,02	0,03	0,46
AM 04	93,1	3,50	0,22	0,11	<0,01	0,08	1,92	0,13	0,02	0,02	0,45
AM 05	86,1	7,28	0,44	0,44	0,01	0,76	3,12	0,22	0,03	0,03	0,78
AM 06	90,8	4,81	0,23	0,10	<0,01	0,14	3,01	0,06	0,01	0,02	0,43
AM 07	92,7	3,68	0,23	0,07	<0,01	0,06	2,21	0,07	0,01	0,02	0,27

As análises químicas apresentadas indicaram uma similaridade entre as amostras, destacando-se as 5 e 6 com teores mais elevados para os óxidos de alumínio, sódio e potássio, sugerindo a existência de feldspato associado ao quartzo (areia feldspática).

4.1.2 Análises granulométricas

Os resultados da análise granulométrica são apresentados na Tabela 13 e na forma de curvas acumuladas no passante na Figura 21.

Salienta-se que as sete amostras foram colhidas nos lotes direcionados para comercialização direta na construção civil e não refletem as características granulométricas das respectivas jazidas, uma vez que houve um beneficiamento para remoção da fração fina, envolvendo argila, silte e até mesmo areia fina.

Tabela 13 - Distribuição granulométrica das amostras estudadas (% em massa retida)

Abertura (mm)	Tyler (malhas)	Amostra - retido simples (% em massa)						
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
4,76	4	0,28	1,2	2,2	1,2	0,50	6,2	5,4
2,38	8	2,2	4,7	4,8	4,2	1,0	12,7	17,1
1,19	14	9,5	17,4	14,5	15,9	2,1	23,8	17,7
0,84	20	20,8	18,7	18,1	20,0	2,4	20,2	29,3
0,6	28	19,5	24,1	23,9	20,4	5,6	17,9	12,3
0,42	35	19,2	19,8	23,6	18,0	10,0	8,3	7,2
0,3	48	15,0	8,9	8,7	14,6	25,5	4,6	6,1
0,21	65	9,1	4,9	2,6	4,3	24,9	2,1	2,5
0,15	100	3,2	0,10	0,90	1,0	15,7	0,70	0,90
0,105	150	0,70	0,00	0,20	0,30	8,5	0,60	0,80
0,074	200	0,30	0,20	0,20	0,10	3,6	2,3	0,70
fundo	-	0,24	0,00	0,30	0,00	0,20	0,60	0,00
		100	100	100	100	100	100	100

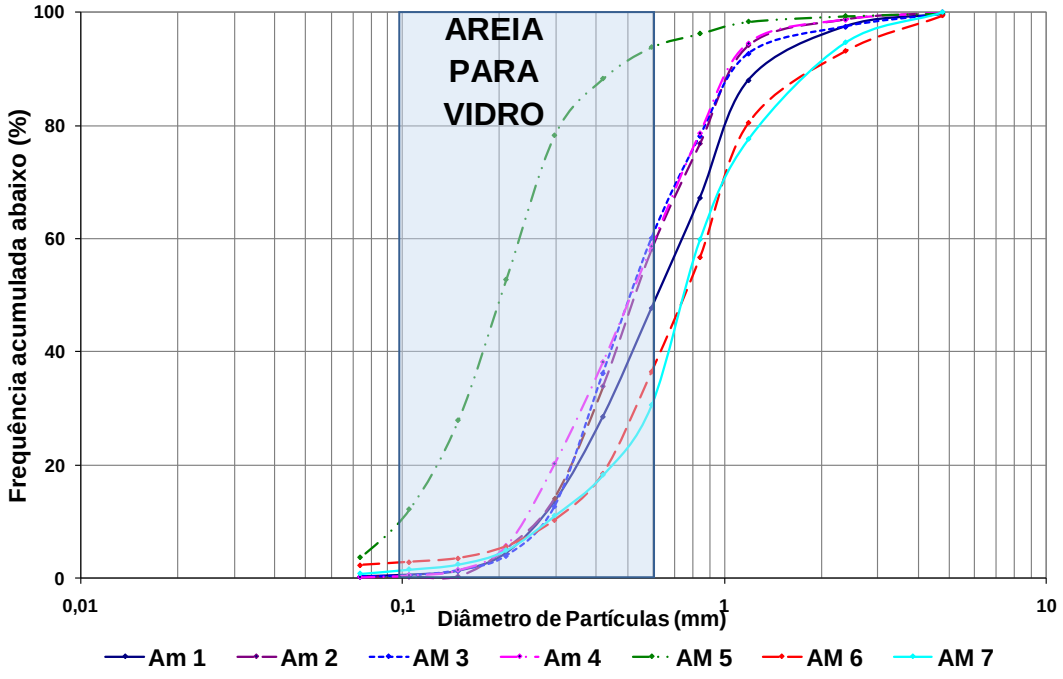


Figura 21 - Representação gráfica da distribuição granulométrica das amostras estudadas e do intervalo granulométrico de areia para vidro

4.1.3 Análises granuloquímicas

Resultados de análises granuloquímicas para as sete amostras coletadas são apresentados da Tabela 14 a Tabela 20. Gráficos comparativos dos teores dos principais óxidos são apresentados comparativamente da Figura 22 a Figura 26.

Tabela 14 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 1

Fração	% massa		Teores (%)							Distribuição (%)			
(mm)	ensaio	ac.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
+1,19	12,0	12,0	90,6	4,7	0,13	2,7	0,07	0,05	0,01	11,8	19,1	4,1	19,6
- 1,19 +0,84	20,8	32,8	92,1	2,6	0,13	1,6	0,07	0,04	0,01	20,8	18,4	7,2	20,3
-0,84 +0,60	19,5	52,2	93,7	2,4	0,16	1,4	0,08	0,04	0,01	19,8	15,9	8,2	16,7
-0,60 +0,42	19,2	71,5	92,8	2,4	0,17	1,4	0,09	0,07	0,01	19,4	15,7	8,7	15,8
-0,42 +0,30	15,0	86,5	93,1	2,7	0,22	1,5	0,10	0,13	0,02	15,2	13,8	8,8	13,1
-0,30 +0,21	9,1	95,6	92,0	3,2	0,87	1,7	0,14	0,82	0,04	9,1	10,0	21,0	9,1
-0,21 +0,105	3,9	99,5	83,6	4,1	3,6	1,9	0,24	3,8	0,15	3,5	5,4	37,1	4,4
-0,105	0,50	100,0	70,7	9,1	3,7	3,5	0,31	3,6	0,13	0,40	1,6	5,0	1,1
Total calculado	100,0		92,1	2,9	0,38	1,7	0,09	0,29	0,02	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			93,9	3,1	0,36	1,8	0,05	0,25	0,03				

Tabela 15 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 2

Fração	% massa		Teores (%)							Distribuição (%)			
(mm)	ensaio	ac.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
+1,19	5,9	5,9	88,5	5,1	0,20	3,1	0,12	0,05	0,01	5,7	9,5	3,2	10,6
- 1,19 +0,84	17,4	23,3	91,6	3,0	0,19	1,9	0,11	0,05	0,01	17,4	16,6	9,1	19,4
-0,84 +0,60	18,7	42,0	93,9	2,7	0,27	1,5	0,12	0,05	0,01	19,2	15,9	13,9	16,8
-0,60 +0,42	24,2	66,1	92,2	2,7	0,27	1,5	0,15	0,06	0,01	24,3	20,7	18,0	20,7
-0,42 +0,30	19,8	85,9	91,6	3,0	0,34	1,6	0,19	0,09	0,01	19,8	18,8	18,5	18,1
-0,30 +0,21	8,9	94,8	92,0	3,3	0,47	1,5	0,21	0,23	0,02	9,0	9,2	11,6	7,9
-0,21 +0,105	5,0	99,8	85,4	5,2	1,6	2,1	0,31	1,2	0,06	4,6	8,2	22,3	6,2
-0,105	0,2	100,0	44,4	21,1	6,2	2,6	0,61	1,0	0,09	0,10	1,3	3,3	0,30
Total calculado	100,0		91,6	3,2	0,36	1,7	0,16	0,13	0,01	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			93,4	3,2	0,37	1,7	0,13	0,14	0,03				

Tabela 16 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 3

Fração	% massa		Teores (%)							Distribuição (%)			
(mm)	ensaio	ac.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
+1,19	7,3	7,3	91,4	3,3	0,10	2,3	0,07	0,03	0,01	7,2	8,1	3,1	10,1
- 1,19 +0,84	14,6	21,8	92,5	2,8	0,11	1,7	0,09	0,05	0,01	14,6	13,9	6,7	15,5
-0,84 +0,60	18,0	39,9	91,7	2,6	0,14	1,5	0,11	0,05	0,01	18,0	16,1	10,6	17,0
-0,60 +0,42	23,9	63,8	93,4	2,6	0,15	1,5	0,14	0,05	0,01	24,2	21,3	15,0	21,6
-0,42 +0,30	23,6	87,4	92,7	2,9	0,20	1,5	0,17	0,08	0,01	23,7	23,3	19,8	22,0
-0,30 +0,21	8,8	96,1	91,9	3,3	0,42	1,6	0,21	0,25	0,02	8,7	9,7	15,4	8,4
-0,21 +0,105	3,5	99,6	86,7	4,8	1,1	2,1	0,30	1,5	0,07	3,3	5,6	24,7	4,4
-0,105	0,4	100,0	59,2	17,1	3,0	4,2	0,45	1,4	0,06	0,20	2,1	4,7	1,0
Total calculado	100,0		92,2	3,0	0,24	1,6	0,14	0,13	0,01	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			94,1	3,1	0,20	1,6	0,11	0,12	0,03				

Tabela 17 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 4

Fração	% massa		Teores (%)							Distribuição (%)			
(mm)	ensaio	ac.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
+1,19	5,5	5,5	89,2	4,6	0,11	3,0	0,08	0,04	0,01	5,3	8,2	2,2	10,0
- 1,19 +0,84	15,9	21,4	92,9	2,9	0,19	1,6	0,11	0,04	0,01	16,0	14,7	10,9	15,7
-0,84 +0,60	20,0	41,4	94,9	2,6	0,17	1,5	0,11	0,05	0,01	20,5	16,5	12,3	18,5
-0,60 +0,42	20,5	61,8	93,1	2,7	0,16	1,4	0,13	0,06	0,01	20,6	17,6	11,8	18,2
-0,42 +0,30	18,0	79,8	91,3	3,1	0,24	1,5	0,17	0,07	0,01	17,8	17,9	15,6	17,0
-0,30 +0,21	14,5	94,4	91,7	3,5	0,37	1,6	0,21	0,21	0,02	14,4	16,1	19,4	14,4
-0,21 +0,105	5,2	99,6	90,0	4,2	1,2	1,7	0,28	0,98	0,05	5,1	7,0	22,5	5,6
-0,105	0,4	100,0	69,2	13,3	3,4	2,5	0,42	2,2	0,09	0,30	1,9	5,4	0,7
Total calculado	100,0		92,4	3,1	0,28	1,6	0,15	0,13	0,01	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			93,1	3,5	0,22	1,9	0,11	0,13	0,02				

Tabela 18 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 5

Fração	% massa		Teores (%)							Distribuição (%)			
(mm)	ensaio	ac.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
+1,19	0,00												
- 1,19 +0,84	0,00												
-0,84 +0,60	6,2	6,2	92,0	2,8	0,13	1,8	0,10	0,04	0,01	6,7	2,5	1,7	3,5
-0,60 +0,42	5,6	11,8	89,3	4,5	0,16	2,4	0,33	0,05	0,01	5,9	3,6	1,9	4,2
-0,42 +0,30	10,0	21,8	85,0	6,6	0,48	3,1	0,49	0,39	0,03	10,0	9,5	10,3	10,0
-0,30 +0,21	25,5	47,3	85,9	6,4	0,22	3,1	0,52	0,08	0,01	25,8	23,4	12,0	25,4
-0,21 +0,105	40,6	87,9	85,5	7,0	0,32	3,3	0,52	0,19	0,02	40,8	40,9	27,8	42,7
-0,105	12,1	100,0	76,6	11,6	1,8	3,6	0,56	0,64	0,04	10,9	20,1	46,3	14,2
Total calculado	100,0		85,1	7,0	0,47	3,1	0,49	0,22	0,02	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			86,1	7,3	0,44	3,1	0,44	0,22	0,03				

Tabela 19 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 6

Fração	% massa		Teores (%)							Distribuição (%)			
(mm)	ensaio	ac.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
+1,19	19,6	19,6	85,8	6,3	0,15	4,5	0,1	0,03	0,01	19,1	24,5	8,0	29,2
- 1,19 +0,84	23,8	43,4	89,9	3,7	0,15	2,6	0,11	0,03	0,01	24,3	17,3	9,8	20,7
-0,84 +0,60	20,2	63,6	90,2	3,7	0,22	2,3	0,15	0,04	0,02	20,7	14,9	12,1	15,5
-0,60 +0,42	18,0	81,5	90,4	4,4	0,20	2,7	0,22	0,04	0,01	18,5	15,8	9,8	15,8
-0,42 +0,30	8,2	89,8	88,2	5,0	0,36	2,9	0,28	0,10	0,02	8,2	8,2	8,1	7,9
-0,30 +0,21	4,6	94,4	87,0	5,6	0,45	3,1	0,34	0,29	0,02	4,6	5,2	5,7	4,7
-0,21 +0,105	2,8	97,2	83,4	7,1	0,94	3,5	0,42	0,73	0,04	2,6	3,9	7,1	3,2
-0,105	2,8	100,0	59,1	18,3	5,1	3,3	0,57	0,83	0,05	1,9	10,2	39,2	3,1
Total calculado	100,0		87,9	5,02	0,37	3,0	0,18	0,09	0,02	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			90,8	4,81	0,23	3,0	0,10	0,06	0,02				

Tabela 20 - Resultados de análise granuloquímica da Amostra 7

Fração	*% massa*		*Teores (%)*							*Distribuição (%)*			
(mm)	*ensaio*	*ac.*	*SiO_2*	*Al_2O_3*	*Fe_2O_3*	*K_2O*	*CaO*	*TiO_2*	*MnO*	*SiO_2*	*Al_2O_3*	*Fe_2O_3*	*K_2O*
+1,19	*22,5*	*22,5*	*91,1*	*3,6*	*0,20*	*2,1*	*0,09*	*0,04*	*0,01*	*22,4*	*26,2*	*9,9*	*28,9*
- 1,19 +0,84	*17,8*	*40,2*	*93,6*	*2,4*	*0,23*	*1,4*	*0,09*	*0,04*	*0,02*	*18,2*	*13,8*	*9,0*	*15,5*
-0,84 +0,60	*29,2*	*69,5*	*92,4*	*2,5*	*0,28*	*1,3*	*0,13*	*0,05*	*0,02*	*29,5*	*23,5*	*18,1*	*23,7*
-0,60 +0,42	*12,4*	*81,8*	*92,2*	*2,8*	*0,35*	*1,3*	*0,17*	*0,10*	*0,02*	*12,5*	*11,2*	*9,6*	*10,4*
-0,42 +0,30	*7,2*	*89,0*	*91,9*	*3,3*	*0,45*	*1,6*	*0,21*	*0,22*	*0,02*	*7,2*	*7,7*	*7,2*	*7,3*
-0,30 +0,21	*6,1*	*95,1*	*90,5*	*3,7*	*0,94*	*1,7*	*0,26*	*0,67*	*0,04*	*6,0*	*7,4*	*12,7*	*6,7*
-0,21 +0,105	*3,4*	*98,5*	*82,5*	*4,9*	*2,7*	*2,1*	*0,35*	*2,2*	*0,10*	*3,0*	*5,4*	*19,9*	*4,5*
-0,105	*1,5*	*100,0*	*71,8*	*9,9*	*4,1*	*3,3*	*0,42*	*1,4*	*0,08*	*1,2*	*4,9*	*13,6*	*3,1*
Total calculado	*100,0*		*91,5*	*3,1*	*0,45*	*1,6*	*0,14*	*0,19*	*0,02*	*100,0*	*100,0*	*100,0*	*100,0*
Total dosado			*92,7*	*3,68*	*0,23*	*2,2*	*0,07*	*0,07*	*0,02*				

Os teores de Fe_2O_3 mostram o mesmo comportamento para todas as amostras; teores de 0,1 - 0,2% nas frações acima de 0,30 mm, crescendo para os finos, com valores máximos da ordem de 3 a 6% para a fração passante em 0,105 mm, conforme apresentado na Figura 22.

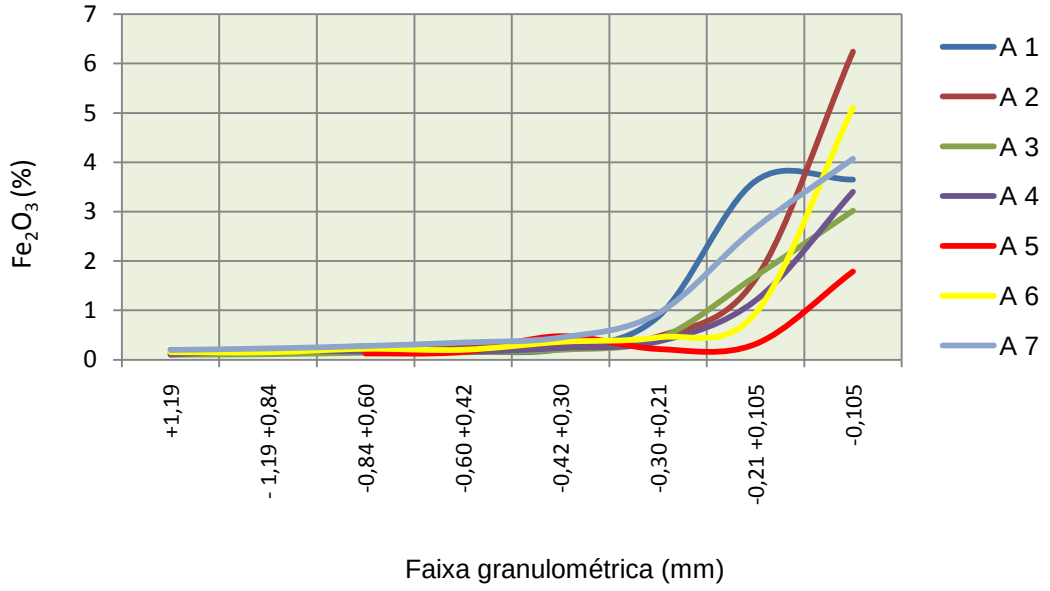


Figura 22 - Teores de Fe_2O_3 por fração granulométrica nas amostras estudadas

Os teores de Al_2O_3 apresentam comportamento semelhante entre as amostras 1, 2, 3, 6 e 7, com teores variando de 2,3 a 4% nas frações acima de 0,3 mm. Nas frações mais finas estes teores se elevam até 21%. As amostras 5 e 6 apresentam teores médios mais elevados, variando de 4 a 6 % nas frações nas maiores que 0,30

mm e de até 18% na fração fina (Figura 23).

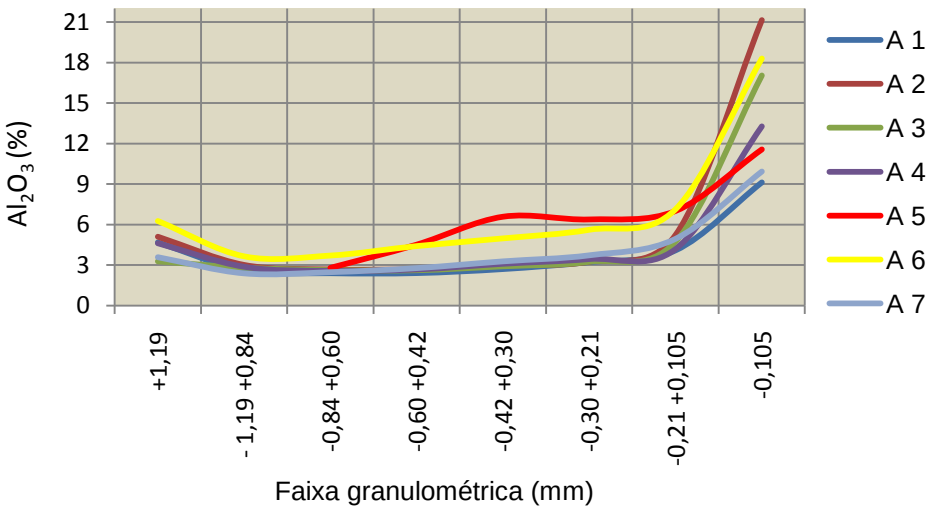


Figura 23 - Teores de Al_2O_3 por fração granulométrica nas amostras estudadas

Os teores de TiO_2 apresentam um comportamento semelhante ao do ferro nas amostras coletadas; acima de 0,30 mm os teores situam-se abaixo de 0,10% de TiO_2, crescendo expressivamente para os finos com teores de até 4% no passante em 0,074 mm. A Figura 24 ilustra este comportamento.

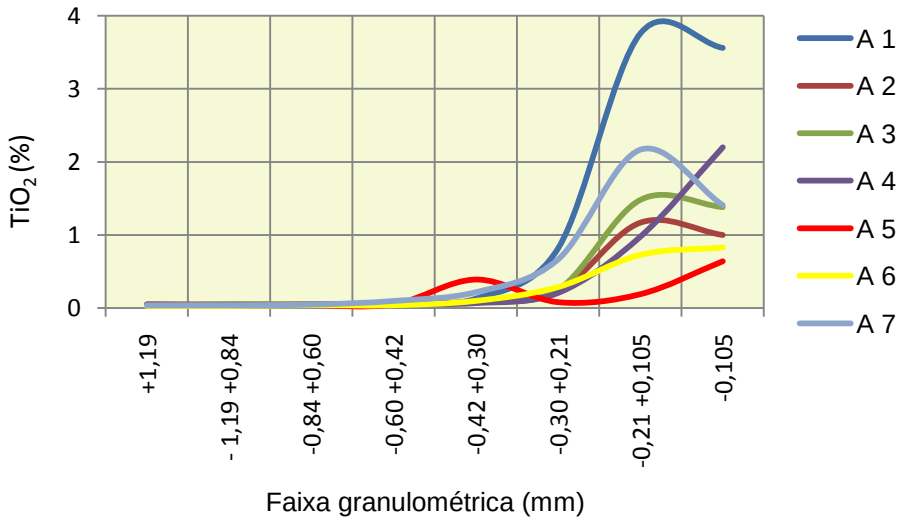


Figura 24 - Teores de TiO_2 por fração granulométrica nas amostras estudadas

A distribuição de teores K_2O é semelhante para as amostras 1, 2, 3, 4 e 7, cujas partículas maiores que 0,84 mm apresentaram teores entre 2 e 3%, reduzindo para

1,5% nas frações intermediárias, elevando-se para até 4,5 % na fração menor que 0,105 mm. As amostras 5 e 6 apresentaram teores mais elevados ao longo de toda distribuição granulométrica, conforme apresentado na Figura 25.

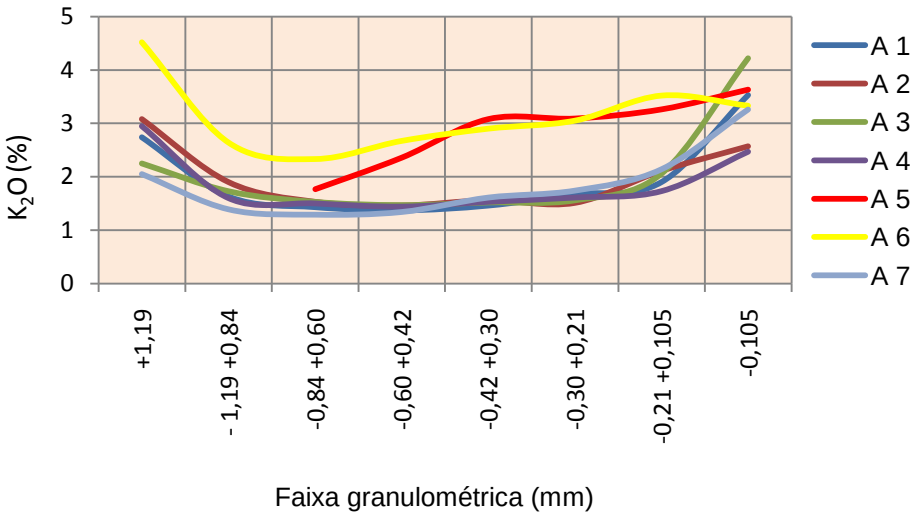


Figura 25 - Teores de K_2O por fração granulométrica nas amostras estudadas

Em todas as amostras os teores de SiO_2 se mantém relativamente constantes até a granulometria acima de 0,105 mm, reduzindo-se significativamente para as frações mais finas, conforme representado na Figura 26

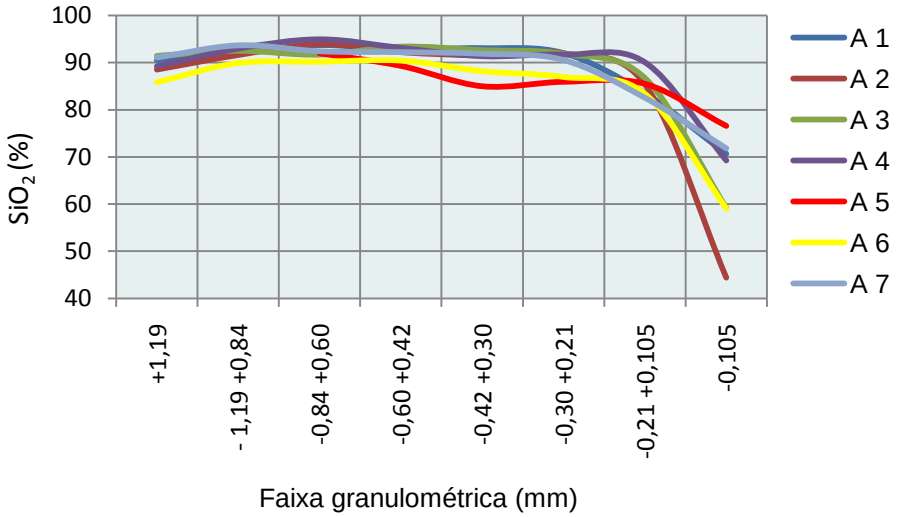


Figura 26 - Teores de SiO_2 por fração granulométrica nas amostras estudadas

4.1.4 Seleção de amostra para estudos detalhados de caracterização

Considerando-se as especificações granulométricas do quartzo para a fabricação do vidro plano (Tabela 4), estabeleceu-se como referência a fração granulométrica de interesse entre 0,60 mm a 0,105 mm. Os conteúdos em massa e características químicas das amostras estudadas para esta fração são apresentados na Tabela 21

Tabela 21 - Conteúdos em massa, teores e distribuições para a fração -0,60 +0,105 mm nas amostras estudadas

Am	*% em massa*	*Teores %*							*Distribuição (%)*			
		SiO_2	*Al_2O_3*	*Fe_2O_3*	*K_2O*	*Na_2O*	*TiO_2*	*PF*	*SiO_2*	*Al_2O_3*	*Fe_2O_3*	*K_2O*
1	*47,2*	*92,1*	*2,90*	*0,38*	*1,67*	*0,04*	*0,29*	*1,40*	*47,2*	*45,0*	*75,5*	*42,4*
2	*57,8*	*91,6*	*3,20*	*0,36*	*1,70*	*0,14*	*0,13*	*2,10*	*57,7*	*56,8*	*70,4*	*52,9*
3	*59,7*	*92,2*	*3,00*	*0,24*	*1,63*	*0,11*	*0,13*	*2,00*	*60,0*	*59,8*	*75,0*	*56,5*
4	*58,2*	*92,4*	*3,10*	*0,28*	*1,62*	*0,13*	*0,13*	*1,90*	*57,9*	*58,7*	*69,2*	*55,1*
5	***81,7***	***85,1***	***7,00***	***0,47***	***3,10***	***0,87***	***0,22***	***2,00***	***82,4***	***77,4***	***52,0***	***82,3***
6	*33,6*	*87,9*	*5,00*	*0,37*	*3,04*	*0,28*	*0,09*	*2,30*	*34,0*	*33,1*	*30,8*	*31,6*
7	*29,0*	*91,5*	*3,10*	*0,45*	*1,59*	*0,12*	*0,19*	*2,10*	*28,8*	*31,6*	*49,3*	*28,9*

A amostra 5 apresenta, no intervalo considerado, conteúdo em massa significativamente superior ao das demais amostras - 82% em massa. Em termos de composição química, refere-se a amostra com o menor conteúdo de sílica e os teores mais elevados em termos de alumina e álcalis, assim como a presença de Fe_2O_3 e TiO_2, tratando-se em realidade de uma areia feldspática.

Embora com maior conteúdo destes elementos, esta foi a selecionada para estudos de detalhe em face do elevado conteúdo em massa presente no intervalo granulométrico de interesse para fabricação de vidro.

4.2 Caracterização detalhada da Amostra 5

Com base na discussão acima a amostra 5 foi objeto de estudos mais detalhados de caracterização visando avaliar o seu potencial para utilização como matéria-prima para a indústria de vidros.

4.2.1 Atrição e separação magnética

A amostra, após atricionada, foi submetida a um peneiramento em via úmida e posterior peneiramento em peneiras com aberturas de 0,60 e 0,105 mm com o descarte das frações extremas; o balanço de massas deste ensaios é apresentado

na Tabela 22 comparativamente à amostra não atricionada.

Pelos resultados, verifica-se que a diferença em massa nas diferentes frações granulométricas foi reduzida, o que comprova uma baixa contaminação superficial dos grãos e também um elevado grau de resistência mecânica.

Tabela 22 - Comparação entre granulometria de material atricionado e não atricionado

Fração (mm)	Não atricionado	Atricionado
+ 0,60	6,2	5,8
- 0,60 +0,105	81,7	81,3
- 0,105	12,1	12,9

Na sequência, tanto a fração -0,60 +0,105 mm do material atricionado como não atricionado foram submetidas à separação magnética; estes resultados estão representados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados da separação magnética de material atricionado e não atricionado

PRODUTO ATRICIONADO													
Produto	% em massa		Teores (%)							Distribuição (%)			
	ensaio	amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
Magnético	1,64	1,3	67,2	11,6	6,31	2,29	0,87	5,32	0,35	1,3	2,9	41,2	1,2
Não magn.	**98,4**	**80,4**	**87,9**	**6,43**	**0,15**	**3,11**	**0,93**	**<0,10**	**<0,10**	**98,7**	**97,1**	**58,8**	**98,8**
Total	100,0	81,7	87,5	6,52	0,25	3,10	0,93	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0
PRODUTO NÃO ATRICIONADO													
Produto	% em massa		Teores (%)							Distribuição (%)			
	ensaio	amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
Magnético	1,38	1,1	59,4	14,1	8,59	2,02	0,79	6,36	0,42	0,9	2,9	42,8	0,9
Não magn.	**98,6**	**80,2**	**87,6**	**6,62**	**0,16**	**3,14**	**0,93**	**<0,10**	**<0,10**	**99,1**	**97,1**	**57,2**	**99,1**
Total.	100,0	81,3	87,2	6,72	0,28	3,12	0,93	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0

Esta operação de atrição não alterou de forma significativa os resultados do produto não magnético, cujo teor de Fe_2O_3 alterou de 0,15% para o atricionado e 0,16% para o não atricionado.

4.2.1.1 Caracterização dos produtos de separação magnética

Os minerais magnéticos estão representados na Tabela 24, sendo o seu maior representante a turmalina. Verifica-se ainda um pequeno percentual de mica

(biotita), além de quartzo e feldspatos associados a mineral magnético não liberado ou com impregnação superficial.

Tabela 24 - Minerais identificados por DRX nos produtos magnéticos, % massa estimada pelo método RIR

Mineral	*Não atricionado*	*Atricionado*
quartzo	55	62
turmalina	42	28
mica	traços	4
ortoclásio	3	6
Total	100	100

As fases acima descritas podem ser observadas no DRX da Figura 27.

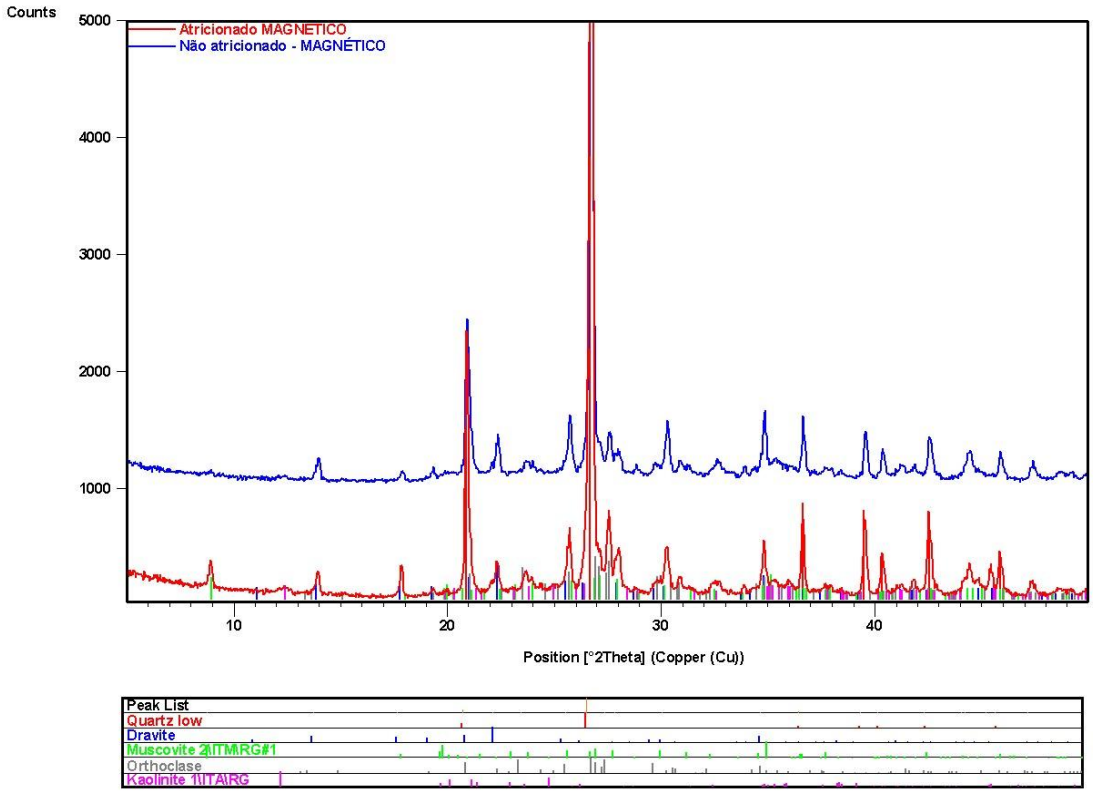


Figura 27 - Difratogramas de raios X comparativos dos produtos magnéticos atricionado e não atricionado

Os minerais não magnéticos são mostrados no difratograma da Figura 28. Seu maior representante é o quartzo, seguido pelo ortoclásio; podem ser observados ainda menores conteúdos de albita e mica. Não se observa diferença entre os produtos não magnéticos atricionado e não atricionado.

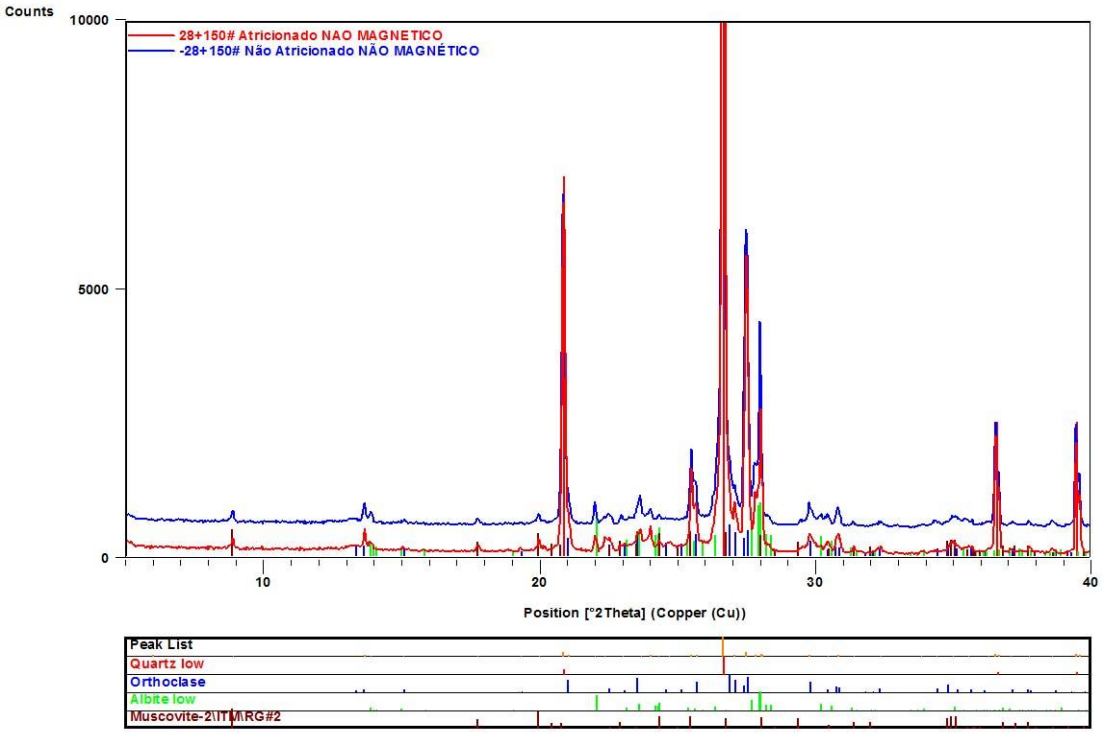


Figura 28 - Difratogramas de raios X comparativos dos produtos não magnéticos atricionado e não atricionado

Imagens de elétrons retroespalhados de montagem de grãos ao MEV ilustrando detalhes dos produtos não magnéticos atricionado e não atricionado são apresentadas da Figura 30 até a Figura 34.

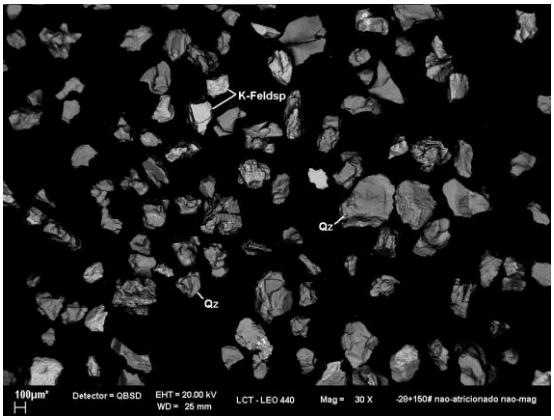


Figura 29 - Imagem de elétrons retroespalhados - não magnético não atricionado

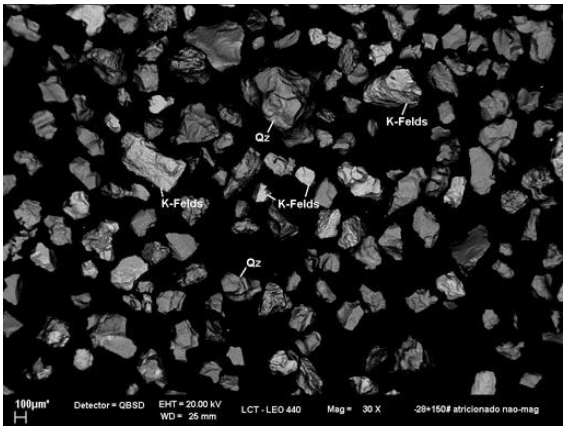


Figura 30 - Imagem de elétrons retroespalhados - não magnético atricionado

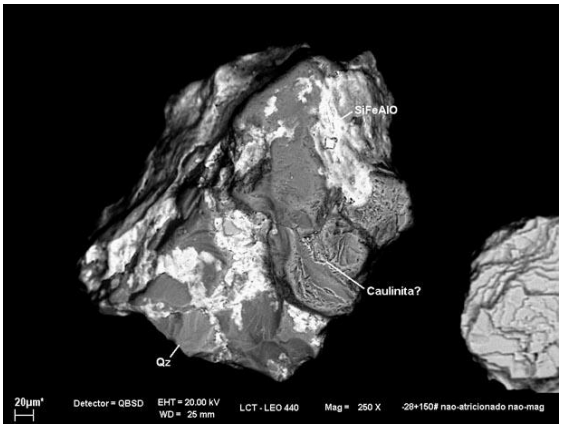


Figura 31 - Presença de incrustações de caulinita-goethita?, SiFeAlO em superfície no quartzo

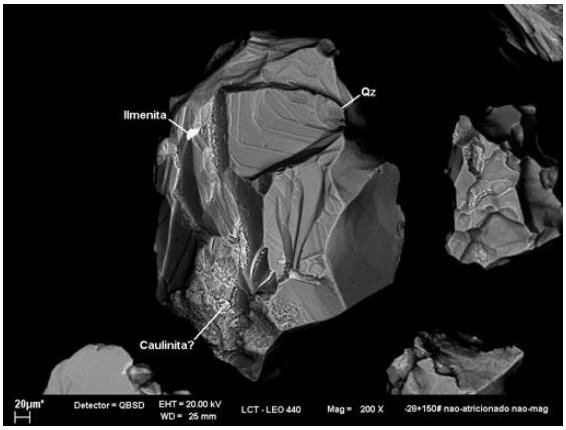


Figura 32 - Inclusão de ilmenita e impregnação superficial de grão de quartzo por caulinita

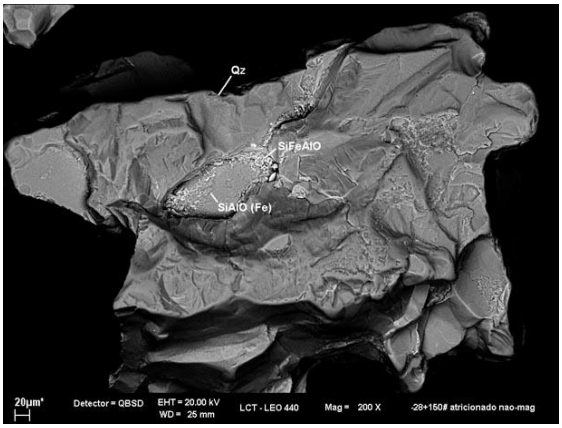


Figura 33 - Incrustação de caulinita SiAlO(Fe) em superfície no quartzo

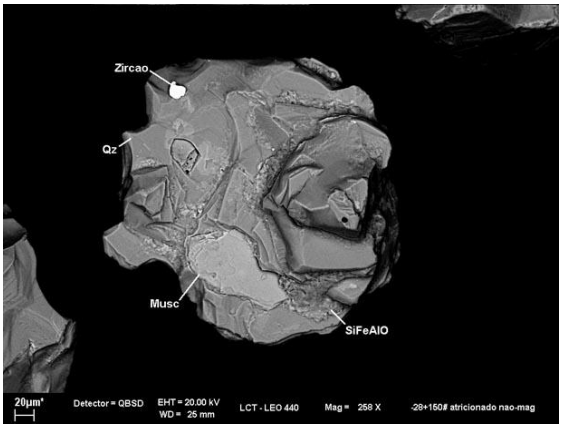


Figura 34 - Incrustação de caulinita em superfície de no quartzo associado com muscovita e zircão

Os produtos não magnéticos são constituídos principalmente por quartzo, por vezes com inclusões de zircão ou ilmenita, sendo relativamente comuns incrustações superficiais de caulinita e, mais raramente, de caulinita-goethita. Feldspatos ocorrem secundariamente ao quartzo.

Imagens destes mesmos produtos em sessões polidas ao MEV são apresentadas da Figura 35 até a Figura 40. A Figura 35 apresenta imagem de elétrons retroespalhados de com feldspatos em tom cinza claro, quartzo em cinza e caulinita, menos frequente, em cinza-escuro. Esta mesma área é ilustrada na Figura 36 através de imagem de composição das distribuições de Si, Al, K e Na por EDS, ilustrando a distribuição e ocorrência destes minerais.

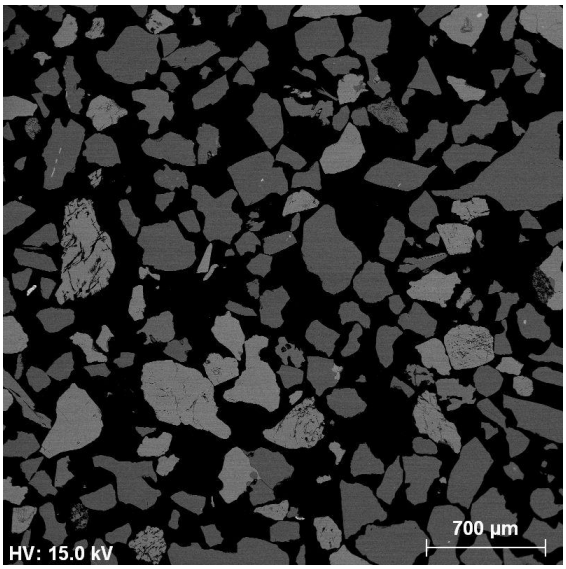


Figura 35 - Imagem de elétrons retroespalhados de seção polida do produto atricionado não magnético ao MEV

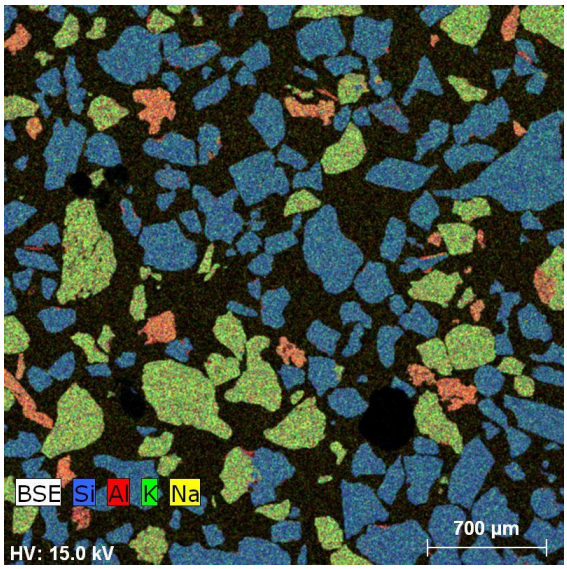


Figura 36 - Imagem de mapeamento de Si, Al, K e Na por EDS relativa à figura 35

A Figura 37 e Figura 38 ilustram grãos de quartzo e feldspato com recobrimentos superficiais parcial de caulinita; caulinita também está presente em microfraturas de feldspatos (alteração); inclusão de zircão pode ser observada em quartzo assim com mica intercrescida com quartzo.

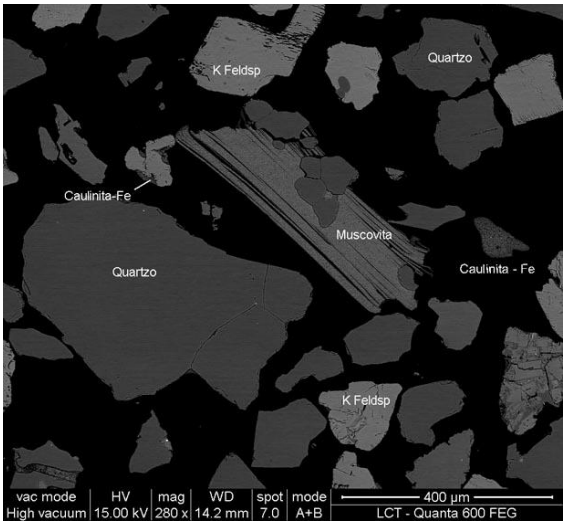


Figura 37 - Imagem de elétrons retroespalhados de seção polida observada no MEV, apresentando diferentes fases e impregnações nos grãos

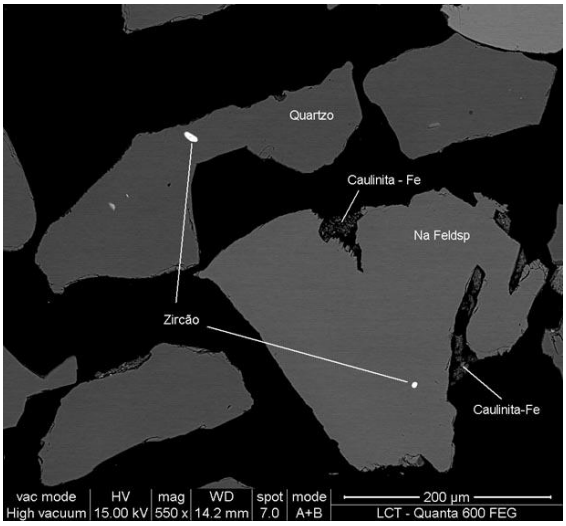


Figura 38 - Imagem de elétrons retroespalhados de seção polida observada no MEV, apresentando contaminações

As Figura 39 e Figura 40 ilustram grãos de feldspatos parcialmente alterados com microfraturas preenchidas por caulinita, assim como também recobrimento superficial parcial por caulinita.

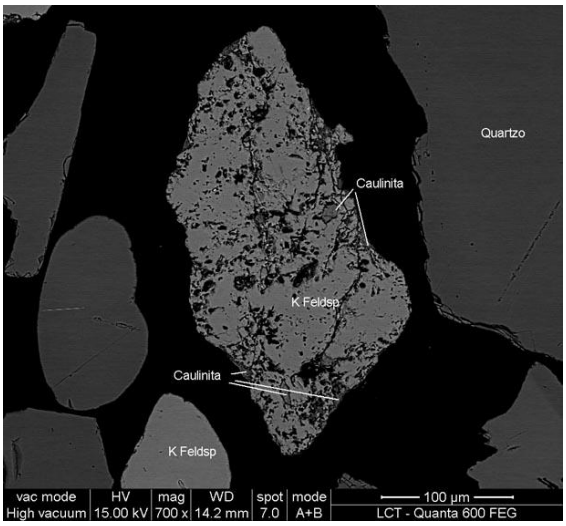


Figura 39 - Imagem de elétrons retro espalhados ao MEV. Feldspatos parcialmente alterados caulinita em microfraturas e bordas

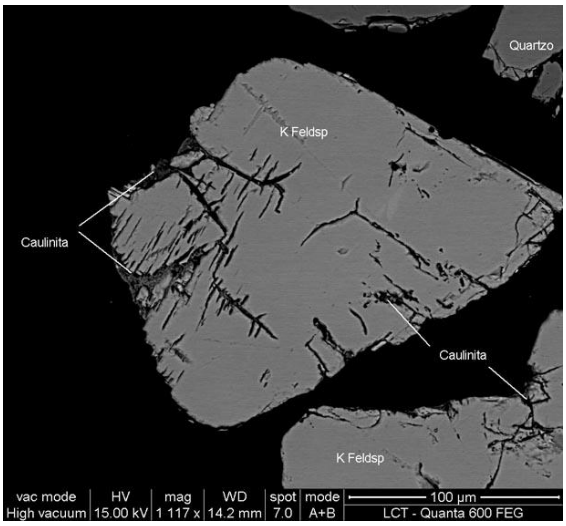


Figura 40 - Idem Figura anterior

4.2.2 Caracterização dos minerais pesados

Considerando a baixa concentração destes minerais na amostra associada à sua importância no processo produtivo, os trabalhos foram direcionados para uma concentração prévia em mesas e posteriormente em líquido denso. Foi realizada uma série de etapas de separações minerais a partir de amostra com cerca de 30 kg de massa. O fluxograma e balanço de massa das várias etapas realizadas estão representados na Figura 41.

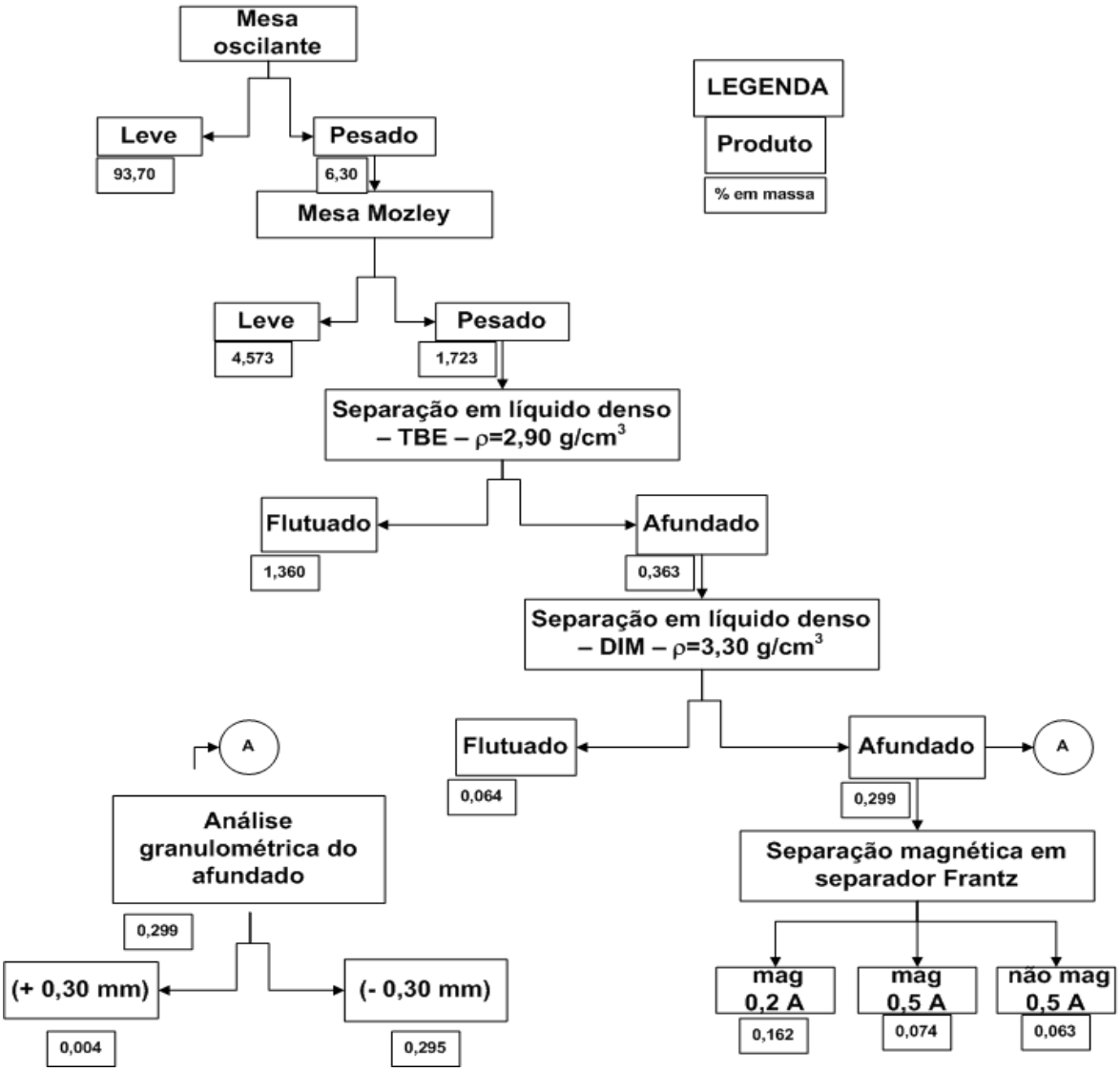
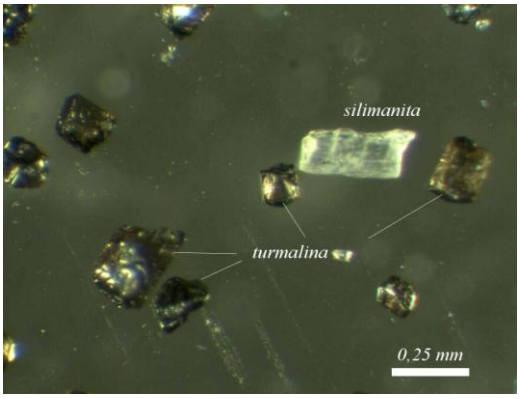


Figura 41 - Fluxograma e balanço de massa da separação de minerais pesados

4.2.2.1 Minerais de densidade intermediária

Conforme observado na Tabela 25, seu maior representante é a turmalina (dravita), ilustrada nas Fotografia 20 e 21

Fotografia 20 - Intermediário 2,90 <d <3,30 turmalina



Fotografia 21 - Intermediário 2,90 <d <3,30 - turmalina e sillimanita

O difatograma da Figura 45 ilustra os picos de dravita, seguidos silimanita, quartzo e zircão

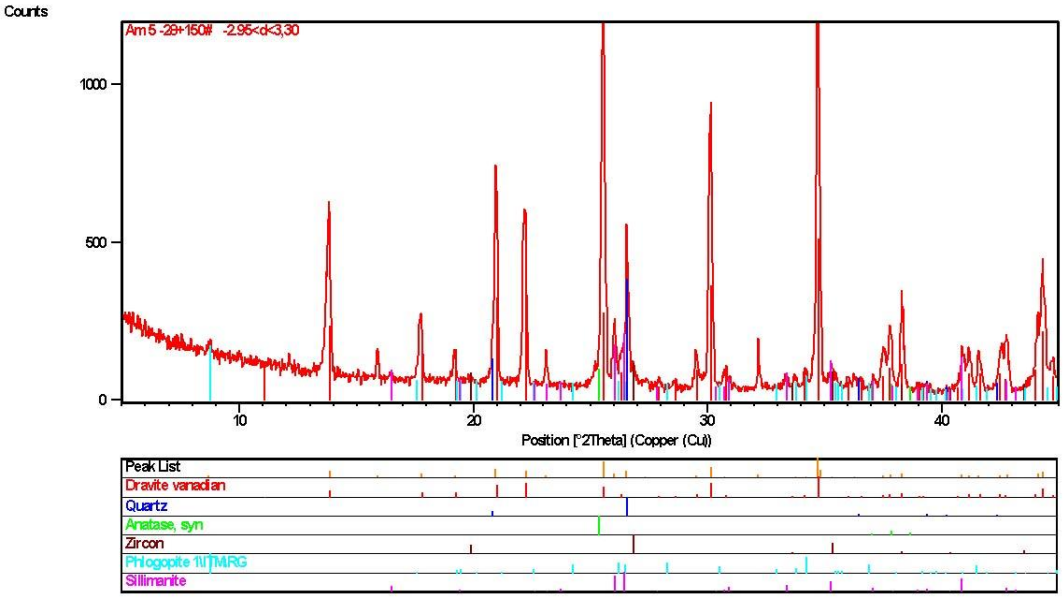
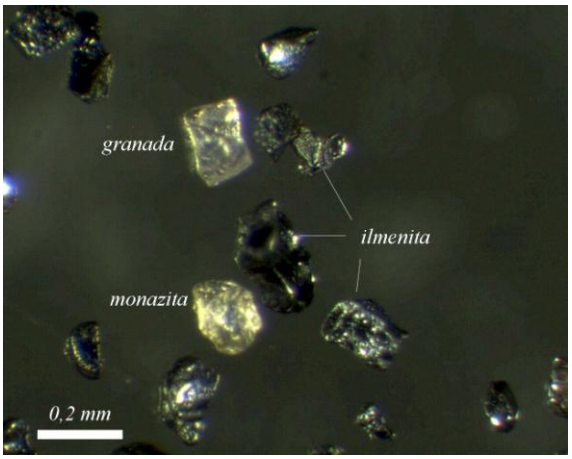


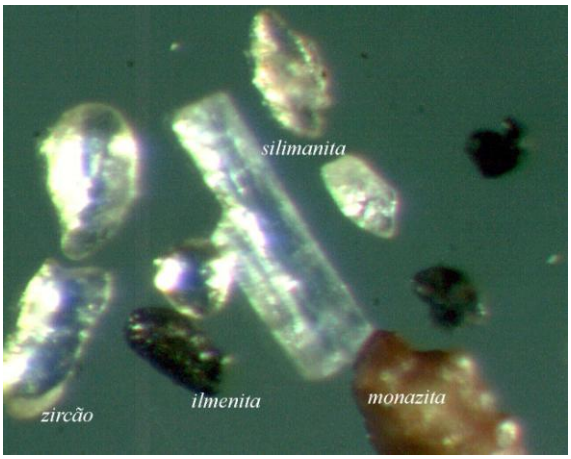
Figura 42 - Difratograma de raios X do produto com densidade intermediária entre 2,90 e 3,30

4.2.2.2 Minerais Pesados

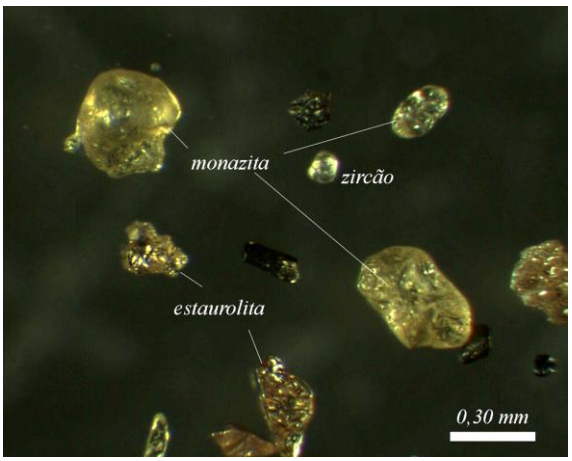
Foram considerados pesados os minerais afundados em líquido de densidade 3,3 g/cm^3 . Este grupo foi subdividido em 3 classes, os magnéticos em 0,2 A, os magnéticos em 0,5 A e os não magnéticos em 0,5 A. Estão ilustradas nas Fotografia 22 a 25 as imagens de estereomicroscópio de partículas dos minerais pesados constituídos por ilmenita, silimanita, zircão, rutilo, monazita, estaurolita e granada.



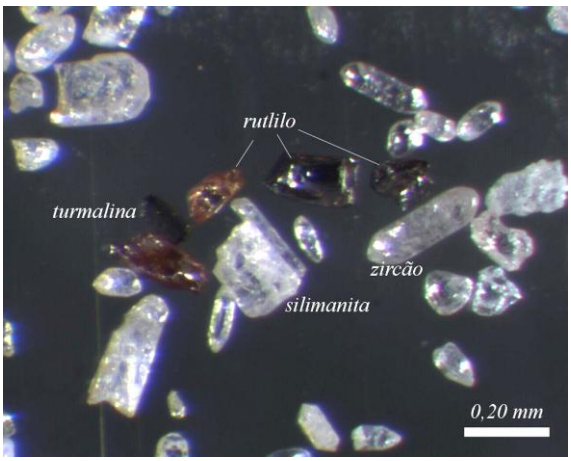
Fotografia 22 - Pesado magnético em 0,2 A- ilmenita, monazita e granada



Fotografia 23 - Pesado magnético em 0,5 A - ilmenita e silimanita



Fotografia 24 - Pesado magnético em 0,5 A- monazita e zircâo



Fotografia 25 - Pesado não magnético em 0,5 A - silimanita, rutilo e zircão

Os difratogramas das Figura 43 a Figura 45 ilustram os minerais pesados das classes relacionadas magnéticos em 0,2 A e 0,5 A e não magnéticos em 0,5 A.

Imagens ao MEV dos principais minerais pesados são ilustradas na Figura 46.

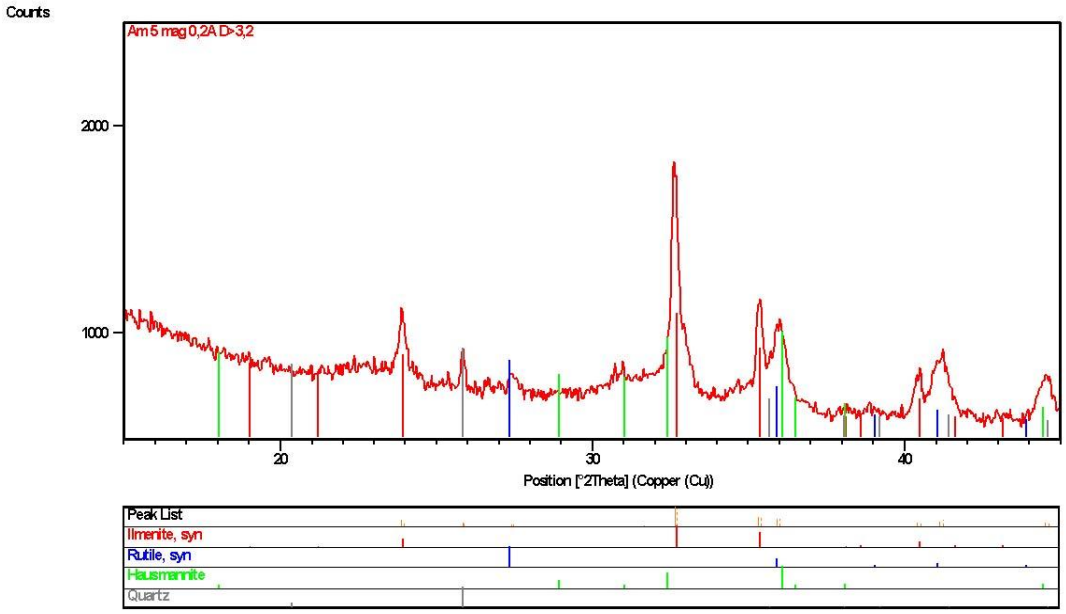


Figura 43 - Difratograma de raios X do produto afundado em 3,30 magnético em 0,2 A (ilmenita, rutilo, hausmanita e quartzo)

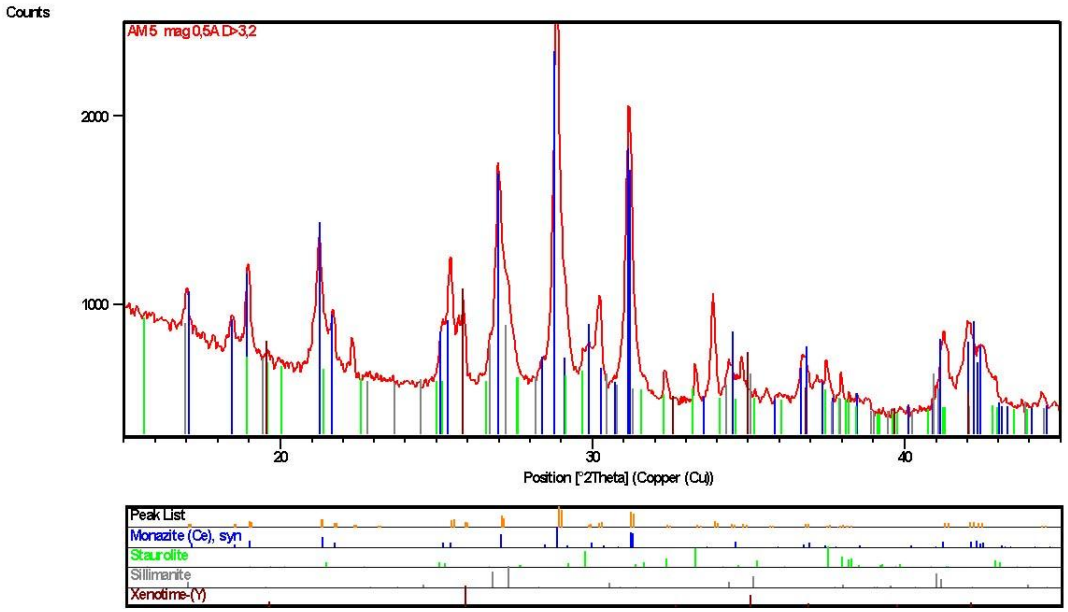


Figura 44 - Difratograma de raios X do produto afundado em 3,30 magnético em 0,5 A (monazita, estaurolita, silimanita e xenontima).

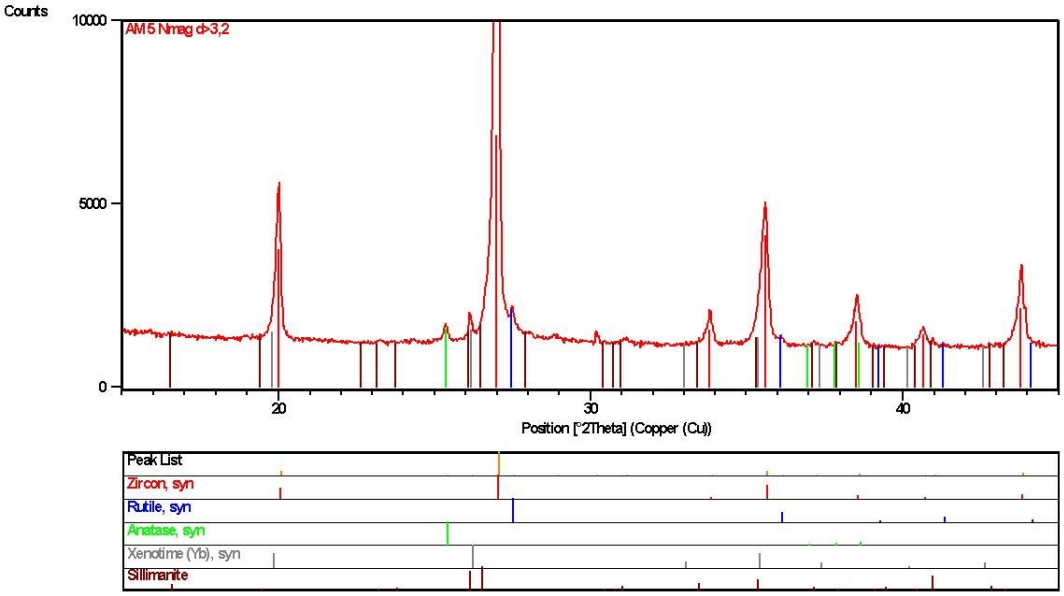
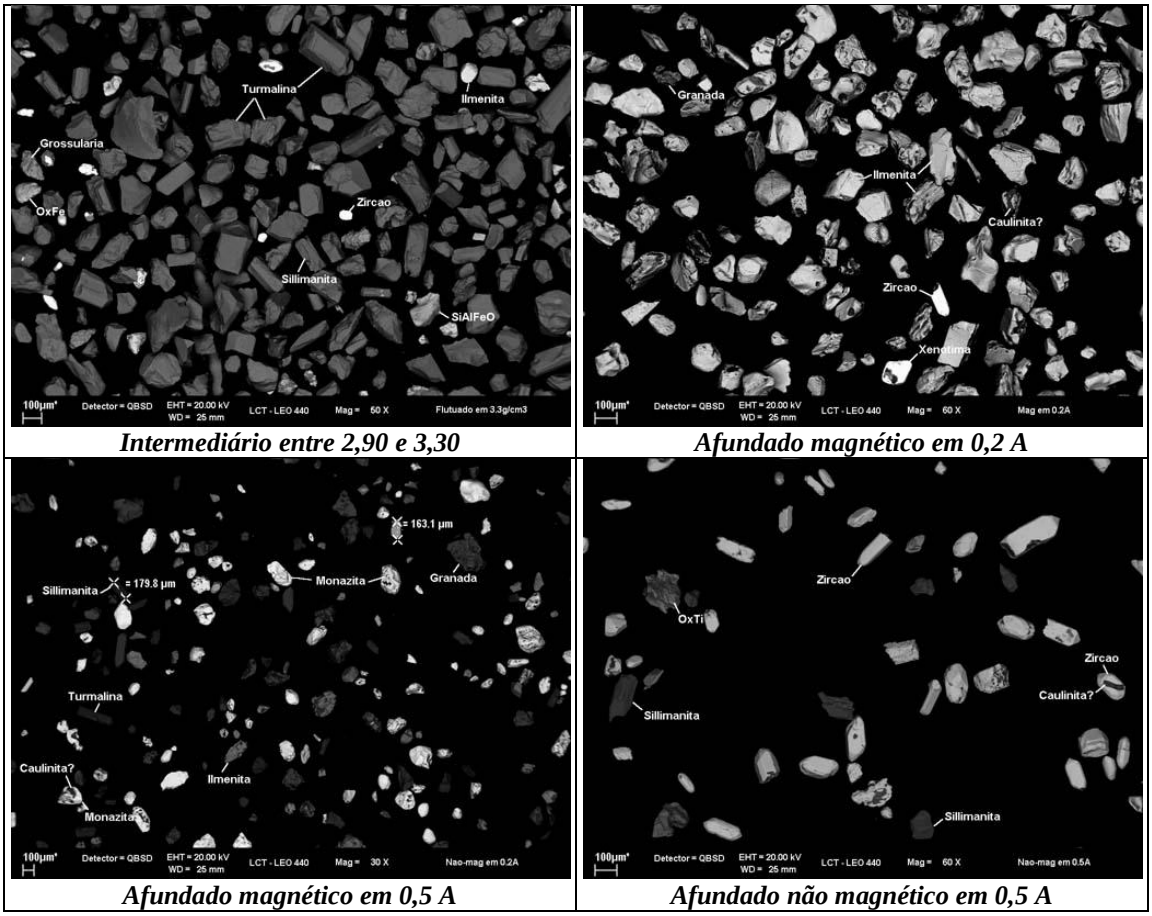


Figura 45 - Difratograma de raios X do produto afundado em 3,30 não magnético (zircão, rutilo, anatásio, xenontima e silimanita.)



Intermediário entre 2,90 e 3,30 | *Afundado magnético em 0,2 A*

Afundado magnético em 0,5 A | *Afundado não magnético em 0,5 A*

Figura 46 - Imagens ao MEV ilustrando os principais minerais pesados

Uma estimativa do conteúdo dos vários minerais pesados por produto obtido foi efetuada a partir da interação de resultados de análises semi quantitativas por DRX (RIR) e FRX, conforme sumário apresentado na Tabela 24.

Tabela 25 - Estimativa do conteúdo dos minerais pesados (% em massa)

Mineral	**2,9<d<3,3**	**d>3,3**			**Total MP**
		mag 0,2 A	**não mag 0,2 A**		
			mag 0,5 A	**não mag 0,5 A**	
% massa	**0,064**	**0,162**	**0, 074**	**0,063**	**0,363**
hausmanita		43			19
ilmenita		42			19
monazita			65		13
zircão	2			71	13
turmalina	67				12
rutilo		15		11	9
silimanita	15		16	13	8
xenotima			12	1	3
quartzo impreg.	11				2
anatásio	1			4	1
estaurolita			4		1
flogopita	4				<1
pseudobrookita			3		<1
soma	100	100	100	100	100

Observa-se que os minerais hausmanita, ilmenita, monazita e zircão respondem por mais de 60% dos minerais pesados.

Ao observar a Tabela 25, depara-se que dentre os 4 minerais pesados, 3 estão classificados como magnéticos em 0,2 e 0,5 A., respondendo por 0,236% dos 0,363% em massa na amostra, o que equivale dizer que 65% dos minerais pesados são magnéticos.

O gráfico da Figura 47 mostra a frequência relativa dos minerais pesados em massa presentes na amostra.

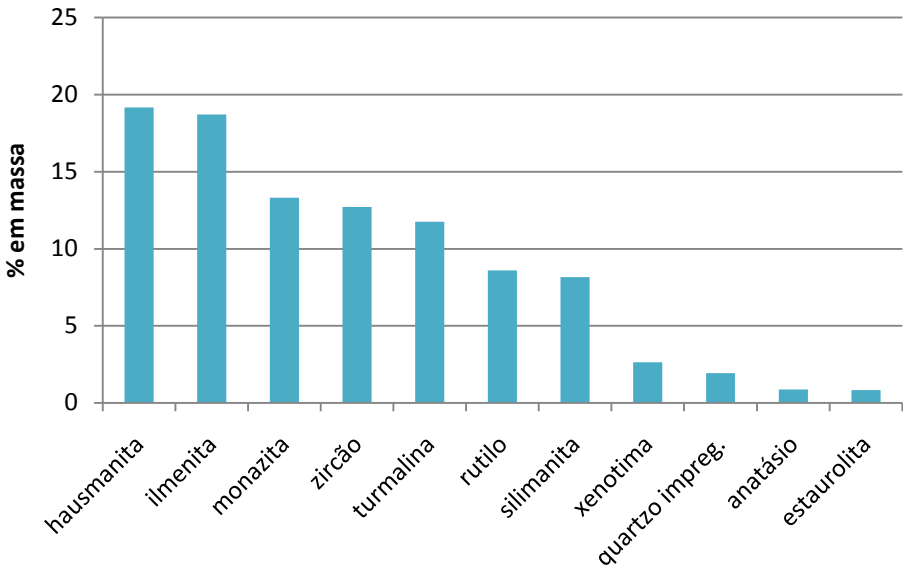


Figura 47 - Gráfico da frequência relativa dos minerais pesados

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como proposta avaliar o aproveitamento da areia da Bacia Sedimentar de Taubaté para a fabricação de vidros em alternativa à utilização atual, a agregado fino para a construção civil.

Das sete amostras analisadas, os estudos concentraram-se em uma amostra e podem ser destacadas as considerações a seguir:

5.1 O produto

Todas as amostras estudadas apresentaram características semelhantes e a amostra 5, da Oásis Mineração, foi a escolhida para a caracterização detalhada e apresentou as seguintes particularidades:

- É uma areia quartzo-feldspática, com aproximadamente 70% de quartzo de 30% de feldspato potássico.
- O teor de Fe_2O_3 na amostra tal qual de 0,45% foi reduzido para 0,16% após uma separação magnética em via úmida.
- Quando atricionada, o teor de Fe_2O_3 desta mesma amostra, de 0,16% foi reduzido para 0,15%, mostrando a baixa eficácia desta operação
- Incrustações de minerais portadores de Fe_2O_3, como argilominerais associados principalmente às microfraturas dos feldspatos em decomposição limitaram a ação da separação magnética.
- Ilmenita e rutilo são os principais minerais responsáveis pela presença do TiO_2.
- Os minerais pesados respondem por 0,299% da amostra, dos quais somente 0,004% tem granulometria superior a 0,30 mm.
- Os minerais pesados e não magnéticos são representados pelo zircão e silimanita.

As demais amostras, com uma menor presença de feldspato em sua composição, apresentaram teores médios inferiores TiO_2 e Fe_2O_3 que a amostra 5.

5.2 O beneficiamento

Este produto, para ser viabilizado como matéria-prima para a fabricação de

vidros planos deverá ser submetido às seguintes operações unitárias de beneficiamento:

- Peneiramento em malha 0,6 mm para eliminar a fração grosseira
- Hidrociclonagem ou separação em classificador helicoidal para remoção das partículas inferiores a 0,105 mm
- Espirais concentradoras para remoção dos minerais pesados
- Separação magnética de alta intensidade para a remoção dos minerais magnéticos.

O produto beneficiado teria a granulometria adequada e um teor de Fe_2O_3 viável para fabricação de vidros das cores verde, fumê e bronze, porém inadequado para vidros incolores.

5.3 Recomendação para trabalhos futuros

As amostras utilizadas neste trabalho foram previamente beneficiadas para o uso na construção civil, parte da fração fina foi eliminada nesta operação e desta maneira não representaram fielmente o material contido nas jazidas de onde foram extraídas.

Recomenda-se uma ampla campanha de sondagem na região e a realização de ensaios granuloquímicos das amostras *in natura,* associadas a uma cubagem prévia para os locais de maior interesse para o aprofundamento de estudos futuros.

Uma vez identificados estes locais, um volume maior de amostra deverá ser destinado aos ensaios exploratórios de beneficiamento (atrição, remoção de pesados e separação magnética), que darão subsídios para os estudos de viabilidade de um empreendimento de mineração para o aproveitamento destas jazidas como fornecedoras de areia industrial para a fabricação de vidros planos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVIDRO. ANUÁRIO ABIVIDRO 2009. IN: VIDRO, A. T. B. D. I. A. D. (ED.). SÃO PAULO, 2009.

ABREU, S. F. RECURSOS MINERAIS DO BRASIL. EDITORA EDGARD BLÜCHER, 1973.

AKERMAN, M. MATÉRIAS PRIMAS VITRIFICÁVEIS. SÃO PAULO: ESCOLA DE VIDRO ABC, 2010. (TRABALHO NÃO PUBLICADO).

AKERMAN, M. A ELABORAÇÃO DO VIDRO. CENTRO TÉCNICO DE ELABORAÇÃO DO VIDRO: SAINT GOBAIN, 2000.

ALMEIDA, A. ET AL. QUALIDADE DE PRODUTO MINERAL II: AREIA INDUSTRIAL. IN: PAULO, E. P. D. U. D. S. (ED.). I SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE MINAS. SÃO PAULO: EPUSP, 2004. P. 689.

ALMEIDA, F. F. M. *ORIGEM E EVOLUÇÃO DA PLATAFORMABRASILEIRA. RIO DE JANEIRO, DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL/DIVISÃO DE GEOLOGIA E MINERALOGIA, 1967, 36 P.* DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL/ DIVISÃO DE GEOLOGIA E MINERALOGIA. RIO DE JANEIRO, P.36. 1967

ARRUNÁTEGUI, H. *PROCESSAMENTO DE MINERAIS II*. OUTRO PRETO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, 1980.

BARBA, A. *ET AL. MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE SOPORTES DE BALDOSAS CERÁMICAS*. CASTELLÓN, ESPANHA: INSTITUTO DE TECNOLOGÍA CERÁMICA- AICE,CAMPUS UNIVERSITARIO RIU SEC. 12006 ESPANHA, 1997.

BAUERMEISTER, K. H. *DISTRIBUIÇÃO E DISPONIBILIDADE DAS ÁREAS DE EXTRAÇÃO DE AREIA PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL, VISANDO O ABASTECIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.* (1996). 108 F. (MESTRADO) - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO PAULO, 1996.

BISH, D. L.; REYNOLDS JR., R. C. SAMPLE PREPARATION FOR X-RAY DIFFRACTION. IN: BISH, D.L.; POST, J.E. (ED.). MODERN POWDER DIFFRACTION. WASHINGTON MINERALOGY SOCIETY OF AMERICA, 1989. P. 73-99. (REVIEWS IN MINERALOGY, V. 20).)

BRASIL_MINERAL. MINERAÇÃO - 'JUNDU COMEÇA OBRAS EM GUARAREMA'. *BRASIL MINERAL ON LINE*. V. ON LINE 394 DE 01/04/2009. REVISTA BRASIL MINERAL: SIGNUS EDITORA LTDA, 2009.

CABRAL JUNIOR, M. ET.AL. RECURSOS MINERAIS DO FANEROZÓICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *GEOCIÊNCIAS*. V. 20. N. 20. *V. 20, N. 1, P. 105-159,*: UNESP, 2001. CAP. 105. P. 55.

CPRM. MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2005.

DANA, J. D.; HURLBUT, C. S. *MANUAL DE MINERALOGIA*. TERCEIRA. ED. RIO DE JANEIRO BRASIL: LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS EDITORA S/A, 1976.

DICKSON, J. *GLASS: A HANDBOOK FOR STUDENTES AND TECHNICIANS*. 300. ED. LONDRES: HUTCHINSON'S SCIENTIFIC AND TECNICAL PUBLICATIONS SERIES, 1951.

GOLDSTEIN, J.I. ET AL. SCANNING ELECTRON MICROSCOPY AND X-RAY MICROANALYSIS: ATEXT FOR BIOLOGISTS, MATERIALS SCIENTISTS, AND GEOLOGISTS. 2 ED. NEW YORK: PLENUM PRESS, 2003. 689 P.)

KAHN, H.; SANT'AGOSTINHO, L. M. METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MATÉRIAS PRIMAS MINERAIS. ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO: DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1997.

KOGEL, J. *ET AL. INDUSTRIAL MINERALS & ROCKS*. LITLETON, COLO: SOCIETY FOR MINING, METALLURGY, AND EXPLORATION, C2006, 2006.

LIMA, M. *ET AL.* PALINOLOGIA DE SEDIMENTOS DA BACIA DE SÃO PAULO, TERCIÁRIO DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. *REVISTA DO INSTITUTO GEOLÓGICO*. V. 12. REV. INST. GEOL. V.12, 1.1/2, SÃO PAULO, DEZ. 1991.

LUIZ, M. L. N. *INFLUÊNCIAS DA SUBSTITUIÇÃO DO SULFATO DE SÓDIO NA PRODUÇÃO DE VIDROS PLANOS SODO-CÁLCICOS PELO PROCESSO "FLOAT"*. (1999). (MSC) - METALURGIA E MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO PAULO, 1999.

LUZ, A.; COELHO, J. M. *ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS*
FELDSPATO. RIO DE JANEIRO: CETEM - MCT,CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2004.

LUZ, A. B.; LINS, F. F. *ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS*. RIO DE JANEIRO: CETEM-MCT,CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2005.

MOREIRA, H. B. XISTO-RESERVAS, PRINCIPAIS RESULTADOS DA ESCALADA E PERSPECTIVAS FUTURAS. IN: SIMPÓSIO SOBRE O APROVEITAMENTO DO XISTO, 1981, SÃO PAULO. **ANAIS**...SÃO PAULO: ACADEMIA CIÊNCIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1981, PUBLICAÇÃO, N. 29. *SIMPÓSIO SOBRE OAPROVEITAMENTO DO XISTO,*. V. 29. SÃO PAULO: ACADEMIA CIÊNCIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1981, 1981.

OLIVEIRA, C. A. TURFA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - INFORME DE RECURSOS MINERAIS - SÉRIE OPORTUNIDADES MINERAIS. IN: CPRM (ED.). V. PROJETO N. 24. SÃO PAULO2001.

RICCOMINI, C. *O RIFT CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL*. (1989). (DOUTOR) - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO PAULO, 1989.

RICCOMINI, C. *ET AL.* ARGILOMINERAIS DO PALEOLAGO TREMEMBÉ E SISTEMAS DEPOSICIONAIS RELACIONADOS (PALEÓGENO, RIFT DO BRASIL. *REVISTA BRASILEIRA DE GEOCIÊNCIAS*. V. 26 (3). N. 26 1996. CAP. 167-180.

RUIZ, M. S. N., M.R. (COORDS.). MERCADO PRODUTORMINERAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. SÃO PAULO. N. 1822. SÃO PAULO: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1990.

SALMANG, H. ET AL. FUNDAMENTOS FISICO QUIMICOS DE LA FABRICACIÓN DEL VIDRIO. MADRID: AGUILAR, 1962.

SAMPAIO, C.H., TAVARES, L.M.M, BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, PORTO ALEGRE - 2005.

SCHNEIDER JR. S. *ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK: CERAMICS AND GLASSES*. ASM INTERNATION THE MATERIALS INFORMATION SOCIETY, 2000.

SHELBY, J. *INTRODUCTION TO GLASS SCIENCE AND TECHNOLOGY*. CAMBRIDGE: THE ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, 1997.

VARNER, J. ADVANCES IN FUSINO AND PROCESSING OF GLASS III. OHIO: THE AMERICAN CERAMIC SOCIETY, 2003.

VARSHNEYA, A. *FUNDAMENTAL OF INORGANIC GLASSES*. BOSTON: ACADEMIC PRESS, 1994.

ZARZYCKI, J. *MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY*. MONTPELLIER: VCH - VERLAGSGESELLSCHAFT MBH, WEINHEIM (FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY)
VCH - PUBLISHERS INC., NEW YORK, NY (USA), 1991.