

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de  
Minas**

Dissertação de Mestrado

**Caracterização dos quartzitos da Formação Taboões, presentes na área da  
mina da ERG Mineração, São Joaquim de Bicas, MG, para usos industriais**

Autor: Walter Gervásio Ladeira

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão

Fevereiro/2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de  
Minas**

**Walter Gervásio Ladeira**

**CARACTERIZAÇÃO DOS QUARTZITOS DA FORMAÇÃO TABOÕES,  
PRESENTES NA ÁREA DA MINA DA ERG MINERAÇÃO, SÃO JOAQUIM DE  
BICAS, MG, PARA USOS INDUSTRIAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão

Belo Horizonte

**Escola de Engenharia da UFMG**

**2014**

L154c

Ladeira, Walter Gervásio.

Caracterização dos quartzitos da Formação Taboões, presentes na área da mina da ERG Mineração, São Joaquim de Bicas, MG, para usos industriais [manuscrito] / Walter Gervásio Ladeira. – 2014.  
xviii, 121 f., enc.: il.

Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 111-121.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.  
3. Quartzito - Teses. 4. Areia - Indústria - Teses. I. Brandão, Paulo Roberto Gomes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.  
III. Título.

CDU: 669(043)

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**À minha esposa Larissa e às minhas filhas,  
Alice e Helena, pelo apoio e paciência durante esta jornada.**

## **Agradecimentos**

O autor agradece, primeiramente, a Deus, que iluminou toda a jornada, e a todos aqueles que direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho, e em particular:

A ERG Mineração e Comércio Ltda. pelo patrocínio e apoio para realização deste trabalho;

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao PROEX – Programa de Excelência Acadêmica pelo patrocínio e apoio dados ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da UFMG;

Aos seguintes órgãos e instituições: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM), pela oportunidade de inserção acadêmica oferecida;

A José Gualberto Baptista Ladeira, Pedro Lucas Gervásio Ladeira, e Ana Cláudia Assis Duarte, que o substituíram inúmeras vezes em trabalhos enquanto estava mergulhado neste projeto;

Ao orientador, professor e amigo de longa data Paulo Roberto Gomes Brandão por todo seu esforço e apoio;

Aos Doutores Júnia Maria de Pinho Rocha e Raul Zanoni Lopes Cançado, pelas valiosas dicas e conselhos dados na defesa de proposta;

À futura geóloga Carolina Menezes Bueno, que muito auxiliou a desbravar a geologia da área em estudo;

Às técnicas de mineração Juliana Oggioni e Cristina Valory, que o deram todo o apoio nas amostragens, na organização das amostras, e nos testes e análises;

Ao futuro engenheiro de minas Vinícius Salles Mol, pela ajuda na formatação final deste trabalho.

## Sumário

Agradecimentos .....	v
Sumário .....	vi
Lista de figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	xii
Lista de equações .....	xv
Lista de gráficos.....	xv
Lista de notações.....	xvi
Resumo .....	xvii
Abstract.....	xviii
1 – Introdução .....	1
2 – Objetivos.....	2
3 – Revisão Bibliográfica .....	3
3.1 – Quartzitos .....	3
3.1.1 – Introdução .....	3
3.1.2 – Geologia Regional.....	4
<i>Quadrilátero Ferrífero</i> .....	4
3.1.3 – Geomorfologia .....	11
3.1.5 – Geologia Local.....	12
3.1.5 – Litotipos do Quartzito .....	14
3.2 – Quartzitos e seus potenciais usos industriais .....	14
3.2.1 – Areia industrial.....	14
3.2.2 – Usos e especificações para produtos de areia industrial .....	17
3.2.2.1 – Areia para vidro.....	18
3.2.2.2 – Areia para fundição .....	22
3.2.2.3 – Sílica de quartzo finamente moída.....	25
3.2.2.4 – Abrasivos.....	29
3.2.2.5 – Fraturamento hidráulico .....	30
3.2.2.6 – Filtração.....	33
3.3 – Análises .....	34
3.3.1 – Análises granulométrica e químicas.....	34
<i>Índice de Finura</i> .....	36
3.3.2 – Difração de raios-X.....	37
3.3.3 – Exame sob MEV-EDS .....	39
3.4 – Testes de processamento .....	40
3.4.1 – Testes de escrubagem/atrição.....	40
<i>Dispersão com ácido cítrico</i> .....	41

<i>Dispersão com silicato de sódio</i> .....	43
<i>Dispersão com hidróxido de sódio</i> .....	45
3.4.2 – Testes de separação magnética.....	46
<i>Separador Magnético a Úmido de Alta Intensidade (WHIMS) para Laboratório</i> .....	47
4 – Metodologia .....	48
4.1 – Materiais .....	48
4.2 – Métodos .....	50
4.2.1 – Preparação preliminar .....	50
4.2.2 – Análises granulométricas .....	50
4.2.3 – Análises químicas.....	50
4.2.4 – Análises instrumentais: lupa binocular .....	51
4.2.5 – Análises instrumentais: MEV-EDS.....	51
4.2.6 – Análises instrumentais: difração de raios-X (DRX) .....	52
4.2.7 – Processamento Mineral .....	52
4.2.7.1 – Preparação das composições .....	53
4.2.7.2 – Testes de atrição/escrubagem.....	54
<i>Preparação da solução de hidróxido de sódio</i> .....	55
<i>Preparação da solução de ácido cítrico anidro</i> .....	55
<i>Preparação da solução de silicato de sódio alcalino</i> .....	56
<i>Escrubagem em branco</i> .....	56
<i>Escrubagem com hidróxido de sódio</i> .....	56
<i>Escrubagem com ácido cítrico</i> .....	57
<i>Escrubagem com silicato de sódio alcalino</i> .....	57
4.2.7.3 – Testes de separação magnética.....	57
5 – Resultados e discussão.....	60
5.1 – Caracterização .....	60
5.1.1 – Análises químicas (amostras coletadas).....	60
5.1.2 – Análises granuloquímicas .....	60
<i>Índice de finura</i> .....	66
5.1.3 – Descrição de amostras sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X .....	75
5.1.4 – Descrição de amostras sob MEV-EDS .....	80
5.1.5 – Determinação dos tipos de contaminação do quartzito.....	89
5.2 – Testes de processamento mineral.....	96
5.2.1 – Testes de atrição/escrubagem.....	98
5.2.2 – Testes de separação magnética.....	100
5.2.3 – Resultados da sequência atrição seguida por separação magnética .....	104
6 – Conclusões .....	107
7 – Relevância dos resultados.....	109
8 – Sugestões para trabalhos futuros.....	110

Referências Bibliográficas.....	111
---------------------------------	-----

## Lista de figuras

Figura III.1 – Mapa geológico-estrutural do Quadrilátero Ferrífero, MG (ALKMIM e MARSHAK, 1998). .....	6
Figura III.2 – Seção esquemática mostrando o quartzito Taboões e seus contatos com as encaixantes Formação Fecho do Funil e Formação Barreiro (BUENO, 2013). .....	13
Figura III.3 – Representação da estrutura do quartzo. Fonte: The Quartz Page <a href="http://www.quartzpage.de/gen_struct.html#i09">http://www.quartzpage.de/gen_struct.html#i09</a> . .....	15
Figura III.4 – Procedimento esquemático de uma operação de fraturamento hidráulico. Injeção de fluido a alta pressão na formação e a abertura de um plano de fratura (CASTRO, 2004). .....	30
Figura III.5 – Gráfico para estimativa visual de esfericidade e arredondamento, segundo KRUMBEIN e SLOSS, 1963. ....	32
Figura III.6 – Interferência entre raios (setas na figura) e os planos cristalinos (linhas horizontais) de uma substância, seguindo a Lei de Bragg. ....	38
Figura III.7 – Padrão de difração de pó (difratograma) do quartzo. ....	39
Figura III.8 – Fórmula estrutural planar do ácido cítrico. ....	41
Figura III.9 – Representação espacial da estrutura do ácido cítrico. ....	42
Figura III.10 – Diagrama de superfície de resposta, sistema silicato/hidróxido, para percentagens de lamas ( <i>slimes</i> ) para amostra A de taconito. 1lb/st = 500g/t. ....	44
Figura III.11 – Grau de dispersão em função de pH para o sistema estudado por CASTRO (2012). .....	46
Figura IV.1 – Vista de bancada aberta na frente de lavra atualmente exposta, mostrando face do talude onde foram coletadas as amostras. ....	49
Figura V.1 (imagem 1) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm. Partícula de quartzo com contaminações de diversos minerais (círculo verde), e partícula de quartzo sem contaminações visíveis nesta imagem (círculo vermelho). ....	81
Figura V.2 (imagem 2) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm partícula 1. Área 1: grão de quartzo sem contaminação. Área 2: filossilicato (moscovita). Área 3: mineral de ferro, hematita. Área 4: mineral de titânio, rutilo (esta fração tem análise química de 0,31% TiO <sub>2</sub> ). Microanálises mostradas na tabela abaixo. ....	82
Figura V.3 (imagem 3) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, área 2. Notar aspecto lamelar do filossilicato (moscovita). .....	83
Figura V.4 (imagem 5) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, partícula 2. Área 1: filossilicato (moscovita). Área 2: grão de quartzo. As microanálises se encontram na tabela abaixo. ....	84

- Figura V.5 (imagem 6) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, partícula 3. Típica partícula de quartzo com recobrimento de argilominerais e minerais de ferro, a ser detalhada a seguir (círculo em vermelho, figura V.6; círculo em verde, figura V.7)..... 85
- Figura V.6 (imagem 7) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, partícula 3, marcada pelo círculo vermelho na Figura V.5. Área 1: quartzo. Área 2: mistura de minerais de ferro com presença de alumínio, sílica e potássio, provável hematita com goethita, caulinita e moscovita. Recobrimento por película similar às visualizadas em lupa binocular. As microanálises se encontram na tabela abaixo. .... 86
- Figura V.7 (imagem 8) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, partícula 3, marcada no círculo verde da figura V.5. Área 1: mineral de ferro, hematita com goethita. As microanálises se encontram na tabela abaixo. .... 87
- Figura V.8 (imagem 9) – Detalhe da amostra SJB01, fração <0,038mm, amostra em pó. Partícula 1: quartzo. Partícula 2: filossilicato (moscovita). Partícula 3: mineral de ferro, hematita. As microanálises se encontram na tabela abaixo. .... 88
- Figura V.9 (foto 35) – Amostra SJB02, fração >1,7mm (>12# Tyler), 10x aumento, detalhe 3: partícula de quartzo leitoso incrustada com minerais de ferro, ao centro. .... 89
- Figura V.10 (foto 77) – Amostra SJB04, fração >1,7mm (>12# Tyler), 40x aumento, detalhe 4. Maior aumento de um grânulo de quartzo leitoso coeso, com pontos de minerais de ferro. Possivelmente este tipo de contaminação somada às partículas amareladas responde pelo teor de 0,87% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nesta fração. .... 90
- Figura V.11 (foto 60) – Amostra SJB03, fração >0,212mm (>70# Tyler), 40x aumento, detalhe 1. Grânulos de quartzo amarelados em meio a outros leitosos. Nesta imagem pode-se ver que os grânulos são praticamente pintados de amarelo: contaminação com minerais de ferro e/ou argilominerais. .... 91
- Figura V.12 (foto 7) – Amostra SJB01, fração >0,71mm (>24# Tyler), 20x aumento, detalhe 2. Notar partículas de quartzo com película de minerais de ferro e/ou argilominerais. Também aqui há um xenogrão de itabirito na porção inferior da foto. . 92
- Figura V.13 (foto 90) – Amostra SJB04, fração >0,106mm (>140# Tyler), 40x aumento, detalhe 1. Nesta fração da amostra SJB04 há pouquíssima presença de minerais de Fe, estando sempre liberados, como no centro da foto. .... 93
- Figura V.14 (foto 67) – Amostra SJB03, fração >0,045mm (>325#), 40x aumento, detalhe 2. No centro, notar partícula de possível mineral de ferro, com brilho metálico e cor negro-acinzentada, característicos da hematita..... 94
- Figura V.15 (foto 5) – Amostra SJB01, fração >0,85mm (>20# Tyler), 20x aumento, detalhe 3. Presença de fragmento de itabirito no canto inferior esquerdo da foto, uma partícula mista de quartzo e mineral de ferro ao centro e partícula de mineral de ferro na porção inferior central..... 95

- Figura V.16 (foto 1) – Amostra SJB01, fração >1,7mm (>12# Tyler), 10x aumento, detalhe 1. Presença de dois fragmentos de itabirito no canto inferior direito da foto, e outro no canto inferior esquerdo..... 96
- Figura V.17 (foto 25) – Amostra SJB01, composição AM01, intervalo -0,5+0,075mm, fração magnética, teste de separação magnética pós-atricção (sem reagente, teste em branco), 40x aumento, detalhe 1: partículas de minerais de ferro capturadas pelo campo magnético, hematitas, possíveis goethitas, partículas mistas com quartzo, partículas de quartzo com apenas alguns pontos de incrustação..... 102
- Figura V.18 (foto 27) – Amostra SJB01, composição AM01, intervalo -0,5+0,075mm, fração magnética, teste de separação magnética pós-atricção com NaOH, 40x aumento, detalhe 1: partículas de minerais de ferro capturadas pelo campo magnético, hematitas, possíveis goethitas, partículas de quartzo com apenas alguns pontos de incrustação (como a do centro da foto). Em algumas partículas de quartzo, não foi visualizado o ponto de incrustação com mineral de ferro, quer seja por estar em local não visível da partícula na foto, quer seja por ter sido a partícula capturada por arraste de outras ferromagnéticas/paramagnéticas..... 103

## Lista de tabelas

Tabela III.1 – Escala granulométrica de Wentworth .....	4
Tabela III.2 – Coluna estratigráfica simplificada do Quadrilátero Ferrífero .....	5
Tabela III.3 – Estratigrafia simplificada do Supergrupo Minas, do topo para a base .....	7
Tabela III.4a – Especificações químicas das areias para as indústrias vidreiras .....	20
Tabela III.4b – Especificações químicas das areias para as indústrias vidreiras .....	21
Tabela III.5 – Especificações granulométricas (% retida acumulada) das areias para as indústrias vidreiras .....	21
Tabela III.6 – Especificações de areia-padrão para testes de fundição (ABNT – NBR 12672) .....	23
Tabela III.7 – Especificações granulométricas de areia para fundição, produto 40/50 – Descalvado Mineração .....	24
Tabela III.8 – Especificações granulométricas de areia para fundição, produto 35/45 – Descalvado Mineração .....	24
Tabela III.9 – Especificações gerais para sílica finamente moída (PV) .....	26
Tabela III.10 – Especificações típicas europeias e norte-americanas para corpos cerâmicos .....	26
Tabela III.11 – Especificações típicas de sílica farinha ( <i>flour</i> ) para esmalte ( <i>enamel</i> ) e esmalte vitrificado ( <i>glaze</i> ) .....	28
Tabela III.12 – Especificações de <i>tripoli</i> usada nas indústrias de plástico, tinta e borracha .....	28
Tabela III.13 – Faixa de resistência a compressão de propantes .....	31
Tabela III.14 – Distribuição granulométrica de uma areia usada para fraturamento hidráulico nos campos de petróleo de Taquipe – BA .....	33
Tabela III.15 – Granulometria típica e composição química de uma areia para filtração .....	34
Tabela III.16 – Tabela para cálculo do índice de finura (segundo RUBIO e NOGUEIRA, 2000) .....	37
Tabela IV.1 – Localização geográfica das amostras coletadas para estudo .....	49
Tabela IV.1 – Peneiras utilizadas na análise granulométrica a úmido .....	51
Tabela IV.2 – Amostra SJB01: massas de amostras utilizadas para formação da composição .....	54
Tabela IV.3 – Amostra SJB03: massas de amostras utilizadas para formação da composição .....	54

Tabela V.1 – Análises globais (cabeça) das quatro amostras selecionadas para o projeto .....	60
Tabela V.2 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB01 .....	59
Tabela V.3 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB02 .....	60
Tabela V.4 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB03 .....	61
Tabela V.5 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB04 .....	62
Tabela V.6 – Mudança do $D_{50}$ das amostras denotando engrossamento do quartzito ....	65
Tabela V.7 – Granulometria da amostra SJB01, incluindo os valores CALCULADOS para as peneiras 30 e 40 da série da ABNT .....	68
Tabela V.8 – Cálculo do índice de finura para a amostra SJB01 .....	68
Tabela V.9 – Granulometria da amostra SJB02, incluindo os valores CALCULADOS para as peneiras 30 e 40 da série da ABNT .....	70
Tabela V.10 – Cálculo do índice de finura para a amostra SJB02 .....	70
Tabela V.11 – Granulometria da amostra SJB03, incluindo os valores CALCULADOS para as peneiras 30 e 40 da série da ABNT .....	72
Tabela V.12 – Cálculo do índice de finura para a amostra SJB03 .....	72
Tabela V.13 – Granulometria da amostra SJB04, incluindo os valores CALCULADOS para as peneiras 30 e 40 da série da ABNT .....	74
Tabela V.14 – Cálculo do índice de finura para a amostra SJB04 .....	75
Tabela V.15 – Amostra SJB01: Frações granulométricas, descrição da visualização sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X .....	76
Tabela V.16 – Amostra SJB02: Frações granulométricas, descrição da visualização sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X .....	77
Tabela V.17 – Amostra SJB03: Frações granulométricas, descrição da visualização sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X .....	78
Tabela V.18 – Amostra SJB04: Frações granulométricas, descrição da visualização sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X .....	79
Tabela V.19 – Resultados de análises químicas dos composições .....	97
Tabela V.20 – AM01: Resultados de análises químicas das amostras submetidas aos testes de atrição .....	99
Tabela V.21 – AM03: Resultados de análises químicas das amostras submetidas aos testes de atrição .....	99
Tabela V.22 – AM01: Resultados de análises químicas das amostras submetidas à separação magnética .....	101

Tabela V.23 – AM03: Resultados de análises químicas das amostras submetidas à separação magnética .....	101
Tabela V.24 – AM01: Resultado final do procedimento de atrição seguida por separação magnética .....	104
Tabela V.25 – AM03: Resultado final do procedimento de atrição seguida por separação magnética .....	105

### Lista de equações

Equação III.1 – Lei de Bragg, onde: $\theta$ é o ângulo de incidência do feixe de radiação, $d$ é a distância entre os planos cristalinos da substância bombardeada por raios-X, $\lambda$ é o comprimento de onda da radiação incidente e $n$ é a ordem da difração. ....	38
Equação V.1 – Correlação entre a abertura da peneira, em mm, e a porcentagem retida acumulada acima para o intervalo abrangendo as peneiras 20 (0,850mm) a 70 (0,212mm) da ABNT para a amostra SJB 01. ....	67
Equação V.2 – Correlação entre a abertura da peneira, em mm, e a porcentagem retida acumulada acima para o intervalo abrangendo as peneiras 20 (0,850mm) a 70 (0,212mm) da ABNT para a amostra SJB02. ....	69
Equação V.3 – Correlação entre a abertura da peneira, em mm, e a porcentagem retida acumulada acima para o intervalo abrangendo as peneiras 20 (0,850mm) a 70 (0,212mm) da ABNT para a amostra SJB03. ....	71
Equação V.4 – Correlação entre a abertura da peneira, em mm, e a porcentagem retida acumulada acima para o intervalo abrangendo as peneiras 20 (0,850mm) a 70 (0,212mm) da ABNT para a amostra SJB04. ....	73
Equação V.5 – Fórmula para cálculo da redução de teor após processamento. ....	99

### Lista de gráficos

Gráfico V.1 – Distribuição granulométrica das amostras em estudo. ....	65
--	----

## Lista de notações

Ga: giga-ano = 1 bilhão de anos = 1.000.000.000 de anos.

psig: *pounds per square inch (gauge)*, libras por polegada quadrada manométrica = 6894,75728MPa.

MPa: megapascal =  $10^6$ Pa.

Pa: a unidade padrão de pressão no SI (Sistema Internacional de Unidades). Equivale a força de 1N aplicada sobre uma superfície de  $1\text{m}^2$ .

$\mu\text{m}$ : micrometro =  $10^{-6}$ m.

mm: milímetro =  $10^{-3}$ m.

#: *mesh*, neste trabalho sempre *mesh* Tyler.

$\text{Fe}_2\text{O}_3$ : óxido de ferro III; fórmula química da hematita.

$\text{Al}_2\text{O}_3$ : óxido de alumínio III, alumina.

$\text{SiO}_2$ : óxido de silício IV, sílica; fórmula química do quartzo.

API: American Petroleum Institute.

AFS: American Foundry Society.

IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

SJB: São Joaquim de Bicas (MG).

RPM: rotações por minuto.

## Resumo

O quartzito da Formação Taboões é um potencial fornecedor de matérias-primas de sílica (areias industriais), e precisa ser bem caracterizado para definição de metodologias de beneficiamento que visem o seu melhor aproveitamento. Dois litotipos foram classificados nos quartzitos intemperizados desta Formação presentes na mina da ERG Mineração em São Joaquim de Bicas – MG: quartzito argiloso e quartzito, sendo a principal diferença entre eles a quantidade relativa de argilominerais. Foram caracterizados os litotipos do quartzito com auxílio de análises granulométricas e químicas, microscopia (óptica e eletrônica de varredura) e difração de raios-X. Estabeleceu-se que os quartzitos *in natura* não atendem às especificações para uso como areia industrial, principalmente devido aos teores de  $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$ , resultantes da presença de hematita, goethita, moscovita e caulinita, distribuídos irregularmente pelas frações granulométricas. Verificou-se que o quartzo tem predominância mássica absoluta sobre os demais minerais, mas não é adequado ao uso como propante, pelo baixo grau de arredondamento. Classificaram-se os quatro tipos de contaminação no quartzito: incrustações no quartzo; películas de argilominerais e minerais de ferro sobre o quartzo; partículas de minerais de ferro liberadas em meio ao quartzito; e partículas de rochas estranhas ao quartzito. Para redução de contaminações do quartzito, estabeleceu-se que a cominuição seria inócua e até deletéria, pois distribuiria as contaminações pelas frações granulométricas. Testes preliminares de processamento mineral foram realizados utilizando uma rota de processo de atrição/escrubagem com os dispersantes silicato de sódio, hidróxido de sódio e ácido cítrico em solução aquosa, seguida por separação magnética de alta intensidade. Os resultados foram tecnicamente viáveis para redução de  $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$ , estimulando estudos mais detalhados desta rota.

## Abstract

The quartzite of Taboões Formation is a potential supplier of raw materials of silica (industrial sands), and must be well characterized to define mineral processing routes aimed at its best use. Two lithotypes were classified in the weathered quartzites from this Formation present in the ERG Mineração mine in São Joaquim de Bicas – MG: clayey quartzite and quartzite, being the main difference between them the relative amount of clay minerals. The quartzite lithotypes were characterized using chemical and particle size analysis, optical and scanning electron microscopies, and X-rays diffraction. It was established that the quartzite *in natura* does not meet specifications for industrial sands, mainly due to the contents of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , resulting from the presence of hematite, goethite, muscovite and kaolinite, irregularly distributed by the size fractions. Quartz has absolute massic predominance over the other minerals, but is unsuitable for use as a proppant, due to its low degree of roundness. Four types of contamination in quartzite were classified: iron minerals encrusted in quartz; films of clay and iron minerals; iron minerals released among quartzite; and rock particles unrelated to quartzite. To reduce contamination in quartzite, it was established that comminution would be innocuous and even deleterious because it would distribute the contaminations to all size fractions. Preliminary mineral processing tests were performed using a route of attrition/scrubbing with the dispersants sodium silicate, sodium hydroxide and citric acid in aqueous solution, followed by high intensity magnetic separation process. Results were technically feasible to reduce  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , thus stimulating more detailed studies of this route.

## **1 – Introdução**

A utilização de rochas silicatadas pelo homem remonta ao período Neolítico. Neste período, nossos ancestrais distantes utilizavam o sílex, rocha sedimentar silicatada, composta basicamente por quartzo criptocristalino, tanto como ferramenta quanto como arma, principalmente devido a sua alta dureza e corte incisivo. Esta característica de dureza das rochas silicatadas, aliada ao ponto de fusão dos compostos de sílica (variando de 1000 até 1850°C) e à grande abundância destes na crosta terrestre, fazem deles uma alternativa muito interessante para diversos usos industriais.

Desde o uso mais comum que vem à mente quando se fala em “areia”, qual seja como componente das argamassas para a construção civil, até os usos mais nobres e menos conhecidos como matéria-prima de alta pureza em sílica para a indústria eletrônica e fibras ópticas, as rochas contendo sílica precisam ser bem caracterizadas para definição de metodologias de beneficiamento visando o seu melhor aproveitamento possível.

A empresa ERG Mineração e Comércio Ltda. é detentora dos direitos minerários de uma faixa de quartzitos da Formação Taboões, localizada em terreno de propriedade da empresa no município de São Joaquim de Bicas – MG.

Até o início dos estudos descritos nesta dissertação, os trabalhos de caracterização tecnológica dos litotipos de quartzito feitos pela empresa nesta área foram muito primários, se limitando a análises químicas globais e algumas poucas análises granulométricas (LADEIRA, 1984). Estes resultados iniciais, contudo, mostraram um potencial de aproveitamento econômico enorme como matéria-prima para usos industriais, dados os níveis de pureza (99,73% SiO<sub>2</sub> em algumas amostras), e de finura dos quartzitos.

## **2 – Objetivos**

Esta pesquisa objetivou:

- Determinar as características dos litotipos de quartzito presentes na área da ERG Mineração em São Joaquim de Bicas – MG, através de análises granulométricas, químicas, mineralógicas e superficiais, identificando os tipos de contaminações presentes nestes.
- Realizar testes iniciais de processamento dos quartzitos para propor rotas de processamento mineral visando à redução das contaminações identificadas, buscando gerar concentrados adequados aos produtos consumidos nos mercados de sílica.

### 3 – Revisão Bibliográfica

#### 3.1 – Quartzitos

##### 3.1.1 – Introdução

O quartzito em estudo pertence à Formação Taboões (2,2 a 2,3Ga), do Grupo Piracicaba, Supergrupo Minas, sendo esta representada por um quartzito fino e maciço (AS MINAS GERAIS, 2011) datado do Proterozóico. Na área em estudo, o quartzito tem uma espessura aparente em planta de aproximadamente 600m.

O quartzito é uma rocha metamórfica cujo componente principal é o quartzo (mais de 75% como ordem de grandeza). Um quartzito pode ter como protólito arenitos quartzosos (origem mais comum), podendo também ser tufos e riolitos silicosos, além de *chert* silicoso. Bolsões (*pods*) ou veios de quartzo, normalmente produtos de segregação metamórfica, são muitas vezes retrabalhados por catáclase e metamorfismo dando origem a quartzitos semelhantes aos de origem sedimentar (WIKIPEDIA, 2014).

O quartzito é composto, basicamente, por grãos de quartzo, cuja granulometria varia desde areia muito grossa até silte médio, segundo a Escala de Wentworth (GRANULOMETRIA, 2011), detalhada na tabela III.1.

A bibliografia relativa a estudos dos quartzitos da Formação Taboões é quase toda voltada para caracterização geológica. Este trabalho faz parte de um esforço inicial de caracterização visando seu aproveitamento industrial e muito ainda há para ser feito.

Tabela III.1 – Escala granulométrica de Wentworth

Intervalo granulométrico (mm)	Nome
>256	Matacão
256 a 64	Bloco ou Calhao
64 a 4,0	Seixo
4,0 a 2,0	Grânulo
2,0 a 1,0	Areia muito grossa
1,0 a 0,50	Areia grossa
0,50 a 0,250	Areia média
0,250 a 0,125	Areia fina
0,125 a 0,062	Areia muito fina
0,062 a 0,031	Silte grosso
0,031 a 0,016	Silte médio
0,016 a 0,008	Silte fino
0,008 a 0,004	Silte muito fino
<0,004	Argila

### 3.1.2 – Geologia Regional

A Formação Taboões, na qual a área em estudo está inserida, é uma unidade estratigráfica que faz parte do Supergrupo Minas, no Quadrilátero Ferrífero.

#### *Quadrilátero Ferrífero*

Do ponto de vista geotectônico, o Quadrilátero Ferrífero está inserido no limite meridional do Cráton do São Francisco, o qual corresponde a uma unidade tectônica de idade arqueana, que foi retrabalhada durante o Ciclo Brasileiro (ALMEIDA, 1977).

Consiste em uma das mais importantes províncias minerais do Brasil, sendo sua complexa geologia regional caracterizada, principalmente, por quatro grandes unidades litoestratigráficas (ALKMIM e MARSHAK, 1998), da base para o topo (figura III.1): Embasamento Cristalino, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi.

Segundo UHLEIN E OLIVEIRA (2000), cada unidade representa um estágio evolutivo que se iniciou com a formação de uma bacia sedimentar, seguida de orogênese,

formação de cadeia montanhosa e, por fim, o aplainamento do relevo devido à erosão. A partir daí, sucedem novos ciclos que envolvem as mesmas etapas. A coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero pode ser sumariada na tabela III.2.

Tabela III.2 – Coluna estratigráfica simplificada do Quadrilátero Ferrífero

COBERTURAS SEDIMENTARES RECENTES				
PROTEROZÓICO	Supergrupo Espinhaço	Grupo Conselheiro Mata	Formação Cambotas	
	Grupo Itacolomi			
	Supergrupo Minas	Grupo Sabará		
		Grupo Piracicaba	Formação Barreiro	
			<b>Formação Taboões</b>	
			Formação Fecho do Funil	
			Formação Cercadinho	
		Grupo Itabira	Formação Gandarela	
			Formação Cauê	
		Grupo Caraça	Formação Batatal	
	Formação Moeda			
ARQUEANO	Supergrupo Rio das Velhas	Grupo Maquiné	Formação Casa Forte	
			Formação Palmital	
		Grupo Nova Lima	Xisto metassedimentar e metavulcânico	
	Grupo Quebra-Osso	Associação metavulcânica máfica-ultramáfica		
TERRENOS GRANITO-GNÁISSICOS-ARQUEANOS				

Fonte: CPRM, 2013.

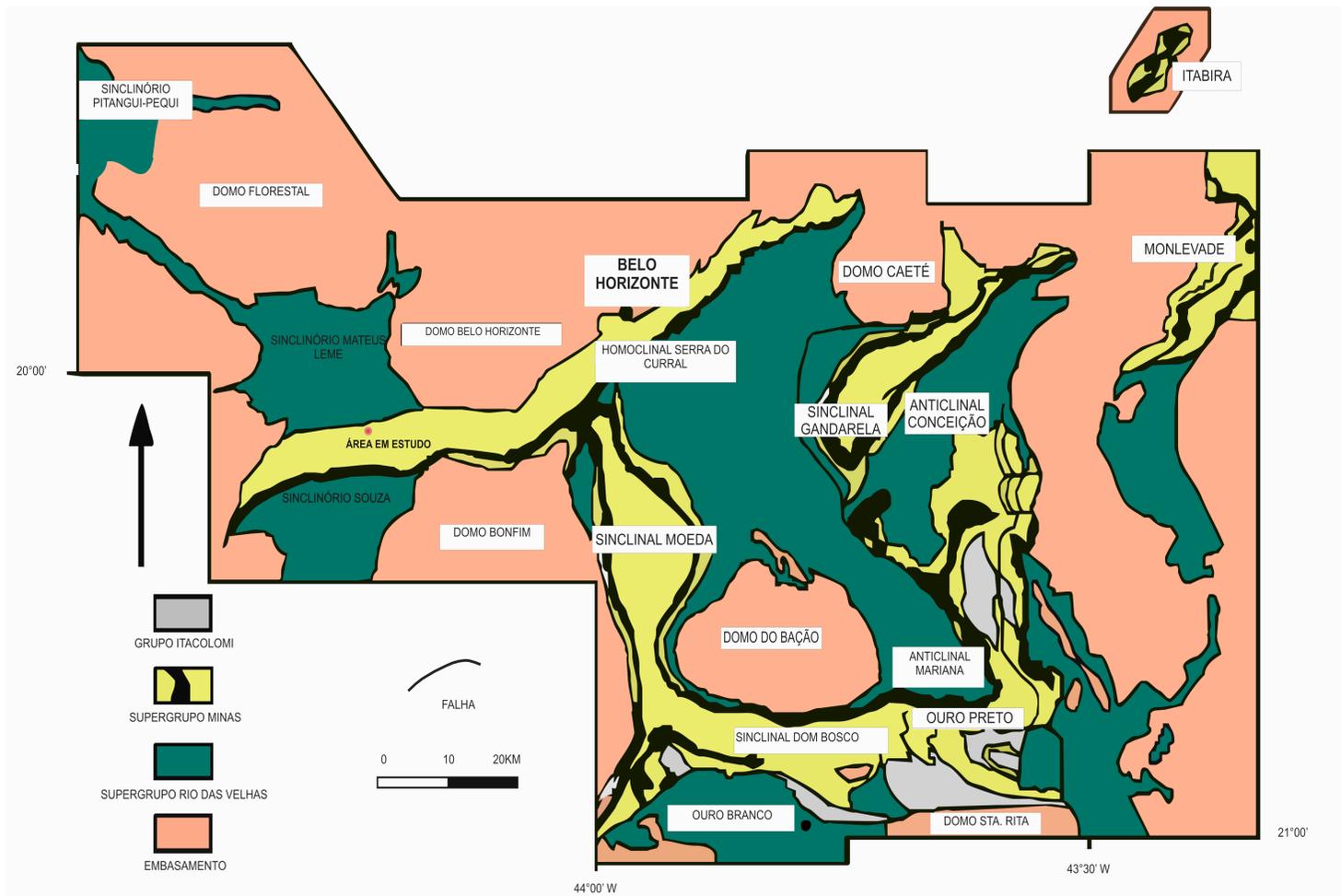


Figura III.1 – Mapa geológico-estrutural do Quadrilátero Ferrífero, MG (ALKMIM e MARSHAK, 1998).

Tabela V.2 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB01

Peneiras		Amostra SJB01												
		Retido		Teores										
#Tyler	mm	%	%Acum. Acima	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
6	3,350	11,16	11,16	91,50	2,55	4,55	0,04	0,19	0,23	0,013	<0,1	0,87	0,02	0,87
12	1,700	2,23	13,39	85,30	4,27	6,35	0,05	0,38	0,43	0,038	<0,1	1,39	0,05	1,43
20	0,850	1,19	14,58	88,20	3,43	4,71	0,05	0,27	0,31	0,020	<0,1	1,13	0,05	1,09
24	0,710	0,55	15,13	91,10	2,15	3,09	0,03	0,17	0,17	<0,01	<0,1	0,70	0,04	0,58
35	0,500	1,51	16,64	94,50	1,29	1,63	0,01	<0,1	0,10	<0,01	<0,1	0,41	<0,01	0,41
50	0,300	4,27	20,91	98,30	1,04	1,30	0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,33	<0,01	0,51
70	0,212	3,91	24,82	97,20	1,19	1,49	0,01	<0,1	0,09	<0,01	<0,1	0,38	0,01	0,43
100	0,150	3,50	28,32	95,40	1,21	1,31	0,01	<0,1	0,09	<0,01	<0,1	0,40	<0,01	0,43
140	0,106	4,82	33,14	95,20	1,27	1,23	<0,01	<0,1	0,09	<0,01	<0,1	0,43	<0,01	0,49
200	0,075	8,63	41,77	95,20	1,08	1,08	<0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,35	<0,01	0,30
270	0,053	6,37	48,15	98,00	0,88	1,22	0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,29	<0,01	0,22
325	0,045	6,91	55,05	98,50	0,64	1,12	<0,01	<0,1	0,06	<0,01	<0,1	0,21	<0,01	0,21
400	0,038	5,49	60,55	96,30	0,80	1,84	0,01	<0,1	0,10	<0,01	<0,1	0,26	<0,01	0,30
FUNDO	-	39,45	100,00	69,80	12,50	7,04	0,03	0,85	0,72	0,056	<0,1	3,46	0,02	4,16
Total:		100,00	-	85,11	5,82	4,09	0,02	0,41	0,36	0,03	<0,1	1,66	0,02	1,94

Tabela V.3 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB02

Peneiras		Amostra SJB02												
		Retido		Teores										
#Tyler	mm	%	%Acum. Acima	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
6	3,350	13,96	13,96	95,20	2,26	1,34	<0,01	0,16	0,22	<0,01	<0,1	0,75	0,05	0,57
12	1,700	0,67	14,63	94,00	2,16	1,96	0,01	0,15	0,19	<0,01	<0,1	0,66	0,15	0,40
20	0,850	1,91	16,54	97,60	0,58	0,53	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	<0,1	0,17	<0,01	0,20
24	0,710	1,00	17,55	97,60	0,35	0,82	0,02	<0,1	0,03	<0,01	<0,1	0,09	<0,01	0,00
35	0,500	8,97	26,51	98,90	0,21	0,66	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	<0,01	0,10
50	0,300	18,28	44,79	99,90	0,18	0,35	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,02
70	0,212	10,20	54,99	98,10	0,17	0,22	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,05
100	0,150	5,14	60,13	98,90	0,28	0,33	<0,01	<0,1	0,01	<0,01	<0,1	0,07	<0,01	0,05
140	0,106	3,06	63,20	98,50	0,32	0,31	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,10	<0,01	0,11
200	0,075	5,37	68,56	97,60	0,35	0,45	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,11	<0,01	0,11
270	0,053	9,38	77,94	97,90	0,34	0,28	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,11	<0,01	0,06
325	0,045	3,91	81,85	99,60	0,32	0,38	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,11	<0,01	0,13
400	0,038	3,24	85,09	99,80	0,42	0,34	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,14	<0,01	0,10
FUNDO	-	14,91	100,00	88,20	4,99	2,79	0,02	0,30	0,19	0,036	<0,1	1,22	0,04	1,83
Total:		100,00	-	96,70	1,26	0,87	<0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,35	<0,01	0,40

Tabela V.4 – Resultados de análises granulométricas: amostra SJB03

Peneiras		Amostra SJB03												
		Retido		Teores										
#Tyler	mm	%	%Acumul. Acima	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
6	3,350	30,51	30,51	98,40	0,30	0,90	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,08	<0,01	0,08
12	1,700	0,71	31,23	99,40	0,31	0,27	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	<0,1	0,05	0,01	0,19
20	0,850	2,02	33,25	98,90	0,28	0,20	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	<0,01	0,15
24	0,710	1,10	34,35	99,50	0,26	0,11	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,09
35	0,500	11,60	45,95	99,10	0,26	0,11	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,10
50	0,300	17,04	63,00	99,20	0,25	0,10	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,14
70	0,212	9,07	72,07	99,50	0,19	0,09	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	0,12
100	0,150	5,39	77,46	99,30	0,14	0,13	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	<0,01	0,19
140	0,106	2,24	79,70	99,90	0,14	0,13	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	<0,01	0,42
200	0,075	2,84	82,54	99,70	0,16	0,17	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	<0,01	0,16
270	0,053	4,09	86,62	99,40	0,24	0,19	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	<0,01	0,15
325	0,045	1,65	88,27	99,10	0,23	0,42	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,07	<0,01	0,24
400	0,038	2,19	90,46	99,10	0,29	0,30	0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,09	<0,01	0,22
FUNDO	-	9,54	100,00	94,90	2,01	1,18	0,01	<0,1	0,08	0,013	<0,1	0,36	<0,01	1,26
Total:		100,00	-	98,60	0,42	0,47	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,09	<0,01	0,24

Tabela V.5 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB04

Peneiras		Amostra SJB04												
		Retido		Teores										
#Tyler	mm	%	%Acumul. Acima	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
6	3,350	40,22	40,22	99,00	0,29	0,77	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	0,02	0,07
12	1,700	0,53	40,75	97,90	0,62	0,87	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,17	0,03	0,31
20	0,850	1,44	42,19	99,10	0,35	0,45	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,07	0,03	0,25
24	0,710	1,07	43,26	99,10	0,22	0,25	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	0,10
35	0,500	12,36	55,62	99,80	0,20	0,16	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	0,12
50	0,300	13,69	69,32	99,20	0,23	0,13	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	0,11
70	0,212	6,84	76,16	99,10	0,17	0,17	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	<0,01	0,06
100	0,150	3,87	80,03	99,10	0,15	0,19	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,01	0,15
140	0,106	2,21	82,24	99,60	0,16	0,25	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,02	0,22
200	0,075	2,47	84,71	99,70	0,17	0,33	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,03	0,19
270	0,053	2,51	87,22	99,60	0,23	0,45	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	0,03	0,26
325	0,045	2,13	89,35	98,70	0,25	0,44	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	0,02	0,23
400	0,038	2,23	91,58	99,10	0,28	0,45	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	0,02	0,27
FUNDO	-	8,42	100,00	93,70	1,98	2,11	0,02	<0,1	0,07	0,033	<0,1	0,28	0,09	1,80
Total:		100,00	-	98,73	0,39	0,60	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,07	0,02	0,25

A tabela III.3 (modificada de RAPOSO, 1996) mostra uma seqüência estratigráfica simplificada do Supergrupo Minas.

Tabela III.3 – Estratigrafia simplificada do Supergrupo Minas, do topo para a base

Supergrupo	Grupo	Formação	Litotipos
Minas	Sabará	indiviso	Mica e cloritaxistos com intercalações de metagrauvaca, quartzito, quartzitos feldspáticos e ferruginoso, formação ferrífera bandada e metaconglomerado
	Piracicaba	Barreiro	Filitos róseos e filitos grafitosos
		<b>Taboões</b>	<b>Ortoquartzitos finos</b>
		Fecho do funil	Filitos, filito dolomítico e dolomito argiloso e silicoso
		Cercadinho	Quartzito ferruginoso, quartzitos, filitos ferruginosos
	Itabira	Gandarela	Dolomitos, filito dolomítico e calcário
		Cauê	Itabirito, itabirito dolomítico hematítico, lentes de xistos e filitos
	Caraça (BASE)	Batatal	Filitos
		Moeda	Quartzitos, filitos e conglomerados

**O Embasamento Cristalino** é constituído por diversos complexos metamórficos, geralmente, periféricos e supracrustais, exceto o Complexo Metamórfico Bação, localizado na porção central do Quadrilátero Ferrífero (HERZ, 1970). São constituídos pelas rochas mais antigas do Quadrilátero Ferrífero, geralmente, terrenos arqueanos com idades que variam entre 3,28 e 2,61 bilhões de anos (MACHADO e CARNEIRO, 1992; CARNEIRO, 1992).

Em seguida, estratigraficamente, da base para o topo, encontram-se três unidades de rochas metassedimentares supracrustais: o Supergrupo Rio das Velhas Arqueano, o Supergrupo Minas Proterozóico, e o Grupo Itacolomi Proterozóico e, no topo, encontra-se a Formação Cambotas pertencente ao Grupo Conselheiro Mata, Supergrupo Espinhaço (CPRM, 2013).

**O Supergrupo Rio das Velhas** é constituído por uma seqüência vulcano-sedimentar

arqueana, tipo *greenstone belt*, com idade aproximada entre 2,7 e 2,8 bilhões de anos, que se encontra sobreposta em discordância ao embasamento cristalino (MACHADO *et alii.*, 1992). Sua litologia é representada por komatiitos e basaltos, rochas vulcanoclásticas, lavas riolíticas e rochas sedimentares (LADEIRA, 1980). Apresenta-se subdividido em dois grupos: Nova Lima e Maquiné (DORR II *et alii.*, 1957).

➤ **O Grupo Nova Lima** ocupa maior área de afloramento no Supergrupo Rio das Velhas, com uma espessura total estimada de 4000 metros, principalmente, na localidade de Nova Lima (DORR II *et alii.*, 1957). É composto basicamente por rochas metavulcânicas (komatiitos, serpentinitos, metabasaltos, esteatitos), metassedimentares clásticas (quartzitos, metaconglomerados e quartzos-xisto) e químicas (xistos carbonáticos, dolomitos, formação ferrífera bandada e filitos grafitosos) (LADEIRA, 1980). Nos pacotes de rochas do Grupo Nova Lima aparecem as principais jazidas de ouro da região, com destaque para as minas localizadas em Caeté, Nova Lima, Raposos, Sabará, Santa Bárbara e Barão de Cocais.

➤ **O Grupo Maquiné** encontra-se sobreposto ao Grupo Nova Lima, sendo formado, essencialmente, por pacotes de rochas clásticas (filitos, xistos e quartzitos), com uma espessura estimada de 1800 metros (DORR II *et alii.*, 1957).

**O Supergrupo Minas** é constituído por metassedimentos plataformais do Proterozóico Inferior, com idades que variam entre 2,5 e 1,8 bilhões de anos, que repousam em nítida discordância erosiva e angular sobre as rochas do Embasamento Cristalino ou do Supergrupo Rio das Velhas (DORR II *et alii.*, 1957; ALKMIM e MARSHAK, 1998).

A área em estudo pertence ao Supergrupo Minas, Grupo Piracicaba e Formação Taboões. Segundo ROSIERE e CHEMALE (2000), a estratigrafia do Supergrupo Minas pode ser dividida em duas megassequências principais: a primeira é uma sequência entre fluvial deltaica e marinha plataformal que inclui os grupos Caraça, Itabira e Piracicaba, sendo a segunda sequência representada pelos depósitos marinhos imaturos do Grupo Sabará.

Segundo ALKMIM e MARSHAK(1998), a partir da gênese do material de origem – sedimentos clásticos ou químicos – o Supergrupo Minas pode ser subdividido da base para o topo em quatro grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará.

➤ **O Grupo Caraça** está situado na base inferior do Supergrupo Minas, sendo constituído por sedimentos clásticos que são divididos, da base para o topo, em **Formações Moeda e Batatal** (WALLACE,1958; MAXWELL,1958).

○ A Formação Moeda possui espessuras variáveis entre 200 e 1200 metros, sendo constituída por quartzitos sericíticos e lentes de conglomerados, gradando para filitos arenosos (WALLACE, 1958; DORR, 1969).

○ A Formação Batatal encontra-se capeando a Formação Moeda, constituída basicamente por filitos e xistos, cujas camadas afloram raramente em alguns escarpamentos e cortes artificiais nas encostas (MAXWELL, 1957 *apud* DORR II *et alii*, 1957).

➤ **O Grupo Itabira** encontra-se depositado sobre o Grupo Caraça, sendo constituído basicamente por metassedimentos químicos (BARBOSA, 1968; DORR *et alii*, 1957), com uma idade estimada de 2,58 bilhões de anos (RENGER *et alii.*, 1994). Segundo DORR II *et alii* (1957), o Grupo Itabira pode ser dividido, da base para o topo, em Formação Cauê e Formação Gandarela.

○ A Formação Cauê apresenta como rochas típicas o itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfíbolítico, onde são encontrados os maiores depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.

○ A Formação Gandarela encontra-se depositada sobre a Formação Cauê, sendo constituída basicamente por rochas carbonáticas e itabiritos dolomíticos, onde são exploradas pedras para ornamentação e construção, além de depósitos de hematita com alto teor de ferro, manganês e de topázio nos distritos de Antônio Pereira e Rodrigo Silva em Ouro Preto (GANDINI, 1994).

- **O Grupo Piracicaba** é constituído por espesso pacote de sedimentos clásticos intercalados na base com lentes de carbonatos (ALKMIM e MARSHAK, 1998), de idade estimada entre 2,4 e 2,159 bilhões de anos (RENGER *et alii*, 1994). A importância econômica desse grupo advém da ocorrência de jazidas de topázio imperial localizadas nas Formações Cercadinho e Fecho do Funil (PIRES *et alii*, 1983). Encontra-se dividido, da base para o topo, em:
- Formação Cercadinho, constituída por filitos, dolomitos, quartzitos, quartzitos ferruginosos;
  - Formação Fecho do Funil, constituída por filitos quartzosos, filitos dolomíticos e dolomitos silicosos;
  - Formação Taboões, constituída por quartzitos lenticulares de granulação fina, na qual a área em estudo se encontra inserida;
  - Formação Barreiro, constituída por filitos e filitos grafitosos (DORR II *et alii*, 1957).
- **O Grupo Sabará** constitui a unidade mais recente do Supergrupo Minas, com idade Paleoproterozóica, aproximadamente 2,1 bilhões de anos, e posiciona-se por discordância erosiva sobre o topo do Grupo Piracicaba (ALMEIDA *et alii*, 2005). Corresponde a uma seqüência de 3000 a 3500 metros de espessura, composta por xistos, filitos, metarenitos, metavulcanoclásticas, metaconglomerados e metadiamicritos (DORR II *et alii*, 1957; RENGAR *et alii*, 1994; ALKMIM e MARSHAK, 1998).

**O Grupo Itacolomi** ocorre de forma restrita no Quadrilátero Ferrífero (ALKMIM, 1985), sendo mais comum no Pico do Itacolomi, Serra de Ouro Branco e no Morro do Frazão. É formado por metassedimentos clásticos proterozóicos (ALKMIM e MARSHAK, 1998), com cerca de 2,1 bilhões de anos (MACHADO *et alii*, 1996), que

repousam através de uma profunda discordância erosiva sobre a parte superior do Supergrupo Minas (BARBOSA e RODRIGUES, 1967). Sua litologia é composta por quartzitos na base e no topo, metaconglomerados na base, e filitos originados de depósitos aluviais e fluviais na porção intermediária (LACOURT, 1936).

**O Supergrupo Espinhaço** aparece localmente no extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero, especialmente na Serra das Cambotas, que se encontra no distrito de Cocais, município de Barão de Cocais. Segundo DOSSIN *et alii* (1985), a sua ocorrência na região está associada aos quartzitos e conglomerados de idade proterozóica, do Grupo Guinda (KNAUER, 1990).

Além desses pacotes de rochas, no Quadrilátero Ferrífero são encontrados diques intrusivos de rochas básicas, aflorantes ou não, de idade estimada em 1,714 bilhões de anos (SILVA *et alii*, 1995) cortando as sequências do Grupo Itacolomi, Supergrupo Minas, bem como bacias de origem terciária e continental que recobrem estratigraficamente unidades pré-cambrianas, denominadas por GORCEIX (1884), como Bacia do Fonseca e Bacia do Gandarela, que aparecem na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero. Há, ainda, as couraças constituídas por fragmentos de rochas ferruginosas, cimentadas por limonita (hidróxido de ferro), conhecidas como cangas. Estas aparecem comumente recobrendo as elevações da Serra da Moeda, Serra do Curral e Serra da Piedade, desempenhando um papel importante de resistência a erosão. Os sedimentos quaternários na região do Quadrilátero Ferrífero estão associados a depósitos aluviais, que aparecem comumente nas planícies de inundação.

### 3.1.3 – Geomorfologia

O Quadrilátero Ferrífero é uma estrutura geológica com uma área 7000km<sup>2</sup> na qual as altitudes variam entre 800 e 900m, sendo frequentemente dominadas por linhas de cristas que ultrapassam, usualmente, a cota 1200m e, excepcionalmente, a cota 2000m, como na borda leste da Serra do Caraça (BUENO, 2013). Sua forma se assemelha a um quadrado e possui seus vértices nos municípios de Mariana, Congonhas, Santa Bárbara e Belo Horizonte.

Quanto ao relevo regional, trata-se de uma estrutura muito complexa de cadeias dobradas por movimentos tectônicos e com um desnivelamento bastante acentuado. As camadas de quartzitos e itabiritos desenham um sistema quadrado de cristas, em posição topográfica dominante com relação às depressões alveolares, abertas nos granitos, gnaisses e xistos.

A área em estudo está localizada na unidade Crista Monoclinal da Serra do Curral. Esta unidade encontra-se na extremidade norte do Quadrilátero Ferrífero, com cristas dominantes e cotas mais elevadas, alcançando 1400m. O alinhamento serrano das cristas se apresenta na direção aproximada WSW-ENE com, aproximadamente, 50km de extensão, entre os fechos do Funil (garganta epigênica do rio Paraopeba) e de Sabará (garganta epigênica do rio das Velhas).

A Serra do Curral representa a aresta setentrional do Quadrilátero Ferrífero, sendo *hogback* extenso, gerada pelo resto do antiforme sinclinal das rochas do Supergrupo Minas sobre o embasamento constituído por rochas graníticas da região de Belo Horizonte (Depressão Periférica de Belo Horizonte). Apresenta as seguintes denominações locais, de oeste para leste: Serra dos Três Irmãos, Serra do Cachimbo, Serra do Curral e Serra do Taquaril.

### 3.1.5 – Geologia Local

O quartzito Taboões mergulha quase sempre com ângulos fortes (figura III.2), próximo à vertical para os quadrantes NE e NW, sobreposto, com contato concordante e de transição brusca, ao filito da Formação Barreiro e abaixo, em contato gradacional, ao filito da Formação Fecho do Funil (BUENO, 2013).

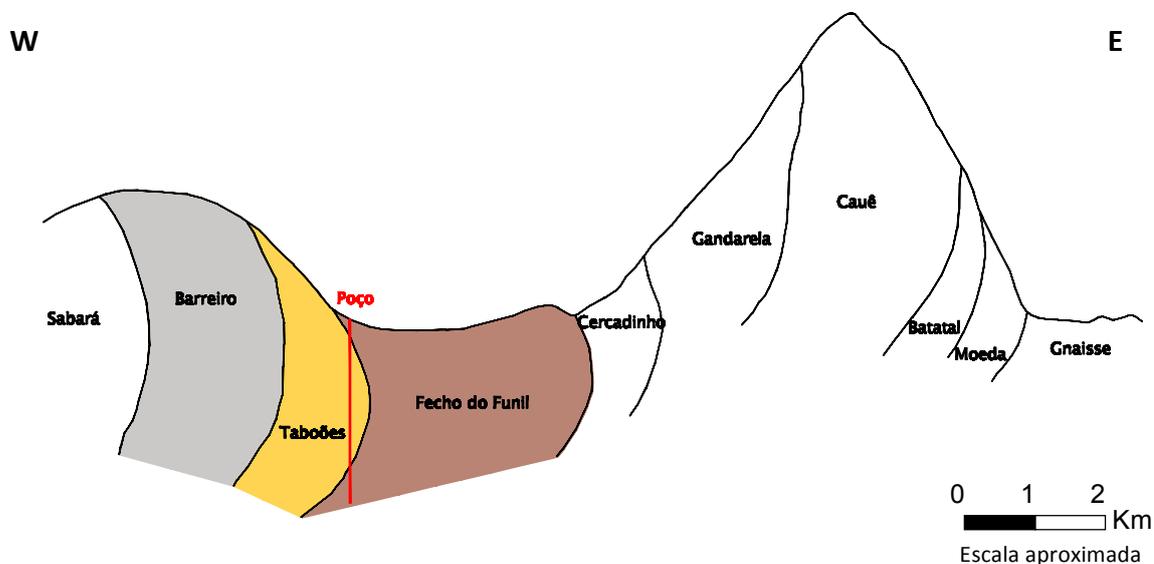


Figura III.2 – Seção esquemática mostrando o quartzito Taboões e seus contatos com as encaixantes Formação Fecho do Funil e Formação Barreiro (BUENO, 2013).

No maciço no qual estão expostas as frentes de lavra, aflora, predominante, o ortoquartzito da Formação Taboões e uma pequena faixa do filito dolomítico da formação Fecho do Funil. O quartzito, localmente, apresenta textura fina, granoblástica com cristais subarredondados, com baixa esfericidade, de cor amarelada, bastante intemperizado. A mineralogia é composta predominantemente de quartzo e frações menores de moscovita, caulinita e traços de hematita e goethita, sendo esses responsáveis pela coloração do maciço. Nos afloramentos é possível identificar diversas famílias de fraturas com mergulhos fortes e com percolação de fluidos hidrotermais (BUENO, 2013).

O filito Fecho do Funil é constituído por dolomita, sericita e quartzo. Apresenta coloração azul acinzentada e foliação fortemente dobrada em dobras abertas e interstratificado com quartzito fino. Apresenta família de fraturas de atitude 40/65. Na área, o filito aflora em dois locais. O primeiro, na cota 800m, apresenta foliação 140/50

e o segundo, na cota 860m, apresenta atitude 50/35. Descreve assim uma dobra recumbente em escala de afloramento (BUENO, 2013).

### 3.1.5 – Litotipos do Quartzito

O teor de sílica não é homogêneo ao longo do maciço, apresentando menor valor perto do contato gradacional, cerca de 3 metros, com o filito da Formação Fecho do Funil. Em razão desta variação, atualmente se classifica o quartzito em dois litotipos (BUENO, 2013):

- Quartzito Taboões típico ou simplesmente quartzito: apresenta teores de sílica em torno de 80-100%; quanto mais afastado do contato com o filito, maior é o teor de sílica.

- Quartzito argiloso: apresenta teores de sílica abaixo de 80%. Este litotipo localiza-se na transição entre a Formação Fecho do Funil e o quartzito Taboões.

## 3.2 – Quartzitos e seus potenciais usos industriais

### 3.2.1 – Areia industrial

Sílica é encontrada na maioria das rochas de qualquer era geológica e virtualmente em todo o mundo. Sílica pode ser encontrada em produtos de uso diário. De cabos de fibra óptica a containeres para bebidas e isolamento, é difícil imaginar o mundo sem produtos derivados da sílica.

O retículo cristalino tridimensional do tetraedro de  $\text{SiO}_4$  consiste de um átomo de silício ligado a quatro átomos de oxigênio. A representação mais comum da estrutura do quartzo é simplesmente um conjunto de quatro células unitárias de tetraedros de  $\text{SiO}_4$ , como pode ser visto na figura III.3.

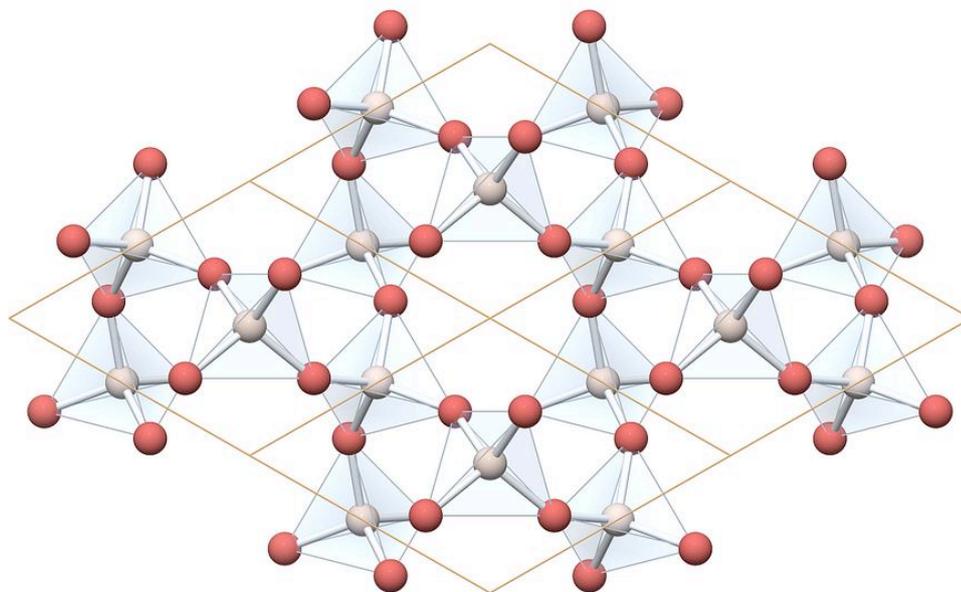


Figura III.3 – Representação da estrutura do quartzo. Fonte: The Quartz Page [http://www.quartzpage.de/gen\\_struct.html#i09](http://www.quartzpage.de/gen_struct.html#i09).

Aproximadamente 64% da crosta da Terra (KLEIN e HURLBUT JR., 1985) é composta por minerais construídos ao redor da rede cristalina de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  ligados entre si. Este mineral pertence à classe dos tectosilicatos na qual todos os íons oxigênio em cada um dos tetraedros de  $\text{SiO}_4$  são compartilhados com o tetraedro vizinho. Isto resulta em uma estrutura estável, fortemente ligada na qual a razão entre o Si:O é 1:2.

Existem pelo menos nove polimorfos de  $\text{SiO}_2$ , um dos quais é sintético (KOGEL *et alii*, 2006). Cada polimorfo tem seu próprio grupo espacial, dimensões de célula, morfologia característica, e energia latente. Os principais polimorfos de  $\text{SiO}_2$  encontrados na natureza se encaixam em três categorias estruturais: quartzo baixo, tridimita baixa e cristobalita baixa. Esta dissertação refere às areias industriais contendo um polimorfo de baixo quartzo.

Quartzo é caracterizado por seu brilho vítreo, fratura conchoidal e forma do cristal. Um grande número de diferentes tipos de quartzo existe, para os quais nomes varietais foram atribuídos. Embora o mineral quartzo seja comum, depósitos de alta qualidade de areias industriais e arenitos são raros. A maioria das areias industriais que os

consumidores preferem são produtos com uma alta percentagem de quartzo puro e correspondentes baixas porcentagens de contaminantes. Contudo, muitos consumidores sacrificam o teor de quartzo em detrimento de outras considerações, tais como preço, cor e disponibilidade (KOGEL, 2006).

As areias industriais são, por definição, aquelas beneficiadas para serem usadas como insumo mineral para a indústria (SCHOBENHAUS, 1997). As aplicações industriais mais comuns, segundo LADEIRA (1984), COELHO (2010) e GEOLOGY.COM (2011), são: areia para fundição, no preparo de moldes de fundição (de não-ferrosos e, mais raramente, ferro fundido), na indústria cerâmica, na fabricação de refratários e de cimento, matéria-prima para produção de vidro, fibra de vidro, fibra óptica, abrasivo para jateamento de superfícies, matéria-prima nos tijolos de concreto celular (“Sical”), matéria-prima para indústria do silício, na indústria química, fabricação de ácidos e de fertilizantes, no fraturamento hidráulico para recuperação secundária de petróleo e gás, como carga e extensores em tintas, borrachas e plásticos, abrasivo no corte de rochas ornamentais por fio helicoidal, fluxante na fusão de metais, como meio filtrante, como abrasivo suave em cosméticos, sabonetes e pastas de dente (caso do trípoli, sílica amorfa de tamanho menor que  $10\mu\text{m}$ ), dentre outros. Também as areias quartzosas têm aplicações não industriais como horticultura e locais de lazer.

Para usos industriais, duas importantes especificações variam conforme o uso, e são em geral consideradas: granulometria (variando de 2mm a  $15\mu\text{m}$ ) e composição química, segundo LADEIRA (1984), GLOBAL SOURCES (2011) e TRADEKEY (2011). De um modo geral, as diferentes aplicações industriais das areias quartzosas são determinadas pelas suas características e propriedades, tais como: a) composição química: teor de sílica, teor de óxidos de ferro, álcalis, matéria orgânica, perda ao fogo, umidade; b) distribuição granulométrica; c) forma dos grãos; d) quantidade de argilominerais. As principais especificações técnicas, de natureza química, para os diferentes usos industriais referem-se aos teores de:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{ZrO}_2$ . Quando se trata de usos específicos, os teores de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  também são considerados (COELHO, 2010).

Estima-se que cerca de 60% da produção nacional atual destinam-se às indústrias de vidro e de fundição, 30% para a fabricação de argamassa e os 10% restantes distribuem-se entre os demais usos. Nos EUA, a indústria de vidro responde por 35% do consumo de areia industrial, seguindo-se a fundição com 18%, fraturamento hidráulico com 14%, produtos para construção 8%, abrasivos com 3% e 22% em outros usos (COELHO, 2010).

As areias para fins industriais caracterizam-se por apresentarem teores elevados de sílica, maior grau de pureza e pela virtual ausência de substâncias contaminantes como, por exemplo, o ferro. Por isso, atingem preços elevados e podem ser consumidas nas indústrias cerâmicas, de vidro, químicas e de abrasivos (ALMEIDA REGO, 2005). As areias industriais recebem denominações próprias em função de suas aplicações, as quais são determinadas pelo conjunto de suas propriedades (RUIZ e NEVES, 1990). Também recebem outras denominações em função de sua origem geológica.

Embora os depósitos de areia comum para construção sejam facilmente encontrados, os depósitos de areia para usos industriais são mais raros. As propriedades especiais das areias industriais – pureza, tamanho de grão cor, inatividade química, dureza, resistência a altas temperaturas – fazem delas frequentemente insubstituíveis para uma variada gama de aplicações industriais. Seu alto teor de sílica permite aplicações mais especializadas, de maior margem de lucro, que as areias para construção civil.

Areia industrial é encontrada em diferentes formas, cores e teores. Em termos gerais, o mineral quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) é o componente principal das areias industriais. Embora a maioria dos depósitos de areia industrial contenha um grande percentual de quartzo (maior que 95%), o uso de areias industriais com teores mais baixos de quartzo está se tornando mais comum, na medida em que a demanda por areias industriais vem crescendo.

### 3.2.2 – Usos e especificações para produtos de areia industrial

Areia industrial que é lavrada e beneficiada para usos industriais deve atender ou exceder as especificações desejadas pelos usuários finais de cada produto.

Especificações são tão variadas quanto seus usuários e frequentemente são levados em consideração frete e disponibilidade.

As especificações seguintes se referem aos produtos mais comuns demandados das areias industriais, para aplicações em: vidro e cerâmica, fundição, cargas e extensores (borrachas, tintas), abrasivos, fraturamento hidráulico (poços de petróleo e gás), e filtração.

### 3.2.2.1 – Areia para vidro

Quartzo é o principal composto formador do vidro. Fabricantes de vidro desfrutam de alguma flexibilidade nas especificações químicas, de tal forma que a maioria das especificações listadas estão ligadas a determinados depósitos minerais. Estas especificações definem os limites e faixas de aceitação para propriedades químicas e distribuição de tamanhos, tais como conteúdo de minerais pesados ou o total de conteúdo de óxido de ferro são críticos para os fabricantes de vidro e requerem limites mais restritos (MILLS, 1983). Óxido de ferro está presente em quase todas as matérias-primas utilizadas na fabricação de vidro e precisa ser estritamente controlado para que a consistência de cor seja mantida no produto final. Os minerais pesados, tais como córindon, zircão e ilmenita, também precisam ser estritamente controlados, pois, devido a sua natureza refratária, não derretem totalmente nos fornos para vidro, resultando em pedras ou “plumas” nos produtos finais.

Areia industrial para vidro pode ser vendida em diversos mercados dentro do segmento vidreiro. Areia é usada na produção de vidros planos, frascos, fibras e em vidros especiais. Vidros especiais é um segmento amplo do mercado vidreiro e sua maior parte abrange vidraria para laboratórios e vidros para iluminação (lâmpadas fluorescentes e incandescentes). Vidros especiais também incluem componentes na indústria eletrônica como fibra óptica e semicondutores.

É difícil para os produtores de areias industriais controlarem rigidamente a composição química de um depósito. Desta forma, a maioria dos consumidores trabalha em parceria

com os produtores para desenvolverem uma especificação que seja aceitável para ambas as partes. Em termos gerais, os consumidores de areias industriais se preocupam mais com a consistência do produto fornecido, o que permite uma operação mais eficiente dos fornos e produtos de qualidade consistente.

Qualquer tipo de areia de quartzo para vidro deve conter, pelos menos, 98,5%  $\text{SiO}_2$  (acima de 99% para vidro plano) com um máximo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em torno de 0,08% para vidro plano, 0,1% para fibra de vidro e 0,3% para vasilhames de vidro colorido. Há outros constituintes, cujas proporções são também rigidamente controladas:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{ZrO}_2$ , e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . A presença de cobre, níquel e cobalto, mesmo em níveis de traços, pode produzir cores e defeitos no vidro, tornando-o inaceitável (HARBEN e KUZVART, 1996).

As tabelas III.4a e III.4b resumem as especificações químicas das areias industriais para as indústrias vidreiras.

Tabela III.4a – Especificações químicas das areias para as indústrias vidreiras

Item	Tipo A <sup>(1)</sup>	Tipo B <sup>(1)</sup>	Tipo C <sup>(1)</sup>	Tipo D <sup>(1)</sup>	Fibra de Vidro <sup>(4)</sup>	Vidro Plano <sup>(2)</sup>
%SiO <sub>2</sub>	≥99,5	≥99,5	≥99,4	≥99,0	≥99,0	-
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤0,20	≤0,20	≤0,30	≤0,50	≤0,30	0,07± 0,02
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤0,002	≤0,015	≤0,03	≤0,15	≤0,50	0,024± 0,010
%TiO <sub>2</sub>	≤0,02	≤0,02	≤0,03	≤0,05	-	-
%ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-
%Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-
%MnO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-
%CaO	-	-	-	-	-	0,005± 0,001
%MgO	-	-	-	-	-	0,003± 0,01
%CaO+MgO	-	-	-	-	-	-
%Ca <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤0,0002	≤0,0003	≤0,0005	≤0,0005	-	-
%K <sub>2</sub> O	-	-	-	-	≤0,10	-
%Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	≤0,10	-
%Perda Fogo	≤0,10	≤0,20	≤0,20	≤0,30	-	-

## Observações:

- Tipo A – vidros especiais (ópticos, oftálmicos, etc.).
- Tipo B – vidros incolores de alta qualidade (cristais, frascarias e artigos de mesa).
- Tipo C – vidros incolores comuns (embalagens em geral e planos).
- Tipo D – vidros coloridos (frascarias, embalagens em geral e vidros planos).

## Fontes:

<sup>(1)</sup> HERMANN, 1992.

<sup>(2)</sup> CRUZ, 2011.

<sup>(4)</sup> KOGEL et alii, 2006.

Tabela III.4b – Especificações químicas das areias para as indústrias vidreiras

Item	Vidro Plano <sup>(4)</sup>	Vasos de cristal <sup>(4)</sup>	Vasilhame N. Jersey <sup>(3)</sup>	Vasilhame Oklahoma <sup>(3)</sup>	Vasilhame Califórnia <sup>(3)</sup>	Vasilhame Fontainebleau <sup>(3)</sup>	Vasilhame Loch Aline <sup>(3)</sup>
%SiO <sub>2</sub>	>99,5	>98,5	99,66	99,73	92,76	99,65	99,73
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,03	<0,5	0,143	0,09	3,779	0,06	0,057
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,04	<0,035	0,025	0,02	0,127	0,02	0,013
%TiO <sub>2</sub>	<0,1	<0,03	0,027	0,012	0,034	-	-
%ZrO <sub>2</sub>	-	<0,01	-	-	-	-	-
%Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<2ppm	<0,05	-	-	-	-	-
%MnO <sub>2</sub>	<0,002ppm	-	-	-	-	-	-
%CaO	-	-	0,007	<0,01	0,06	-	-
%MgO	-	-	0,004	<0,01	0,017	-	-
%CaO+MgO	-	<0,2	-	-	-	-	-
%Ca <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-
%K <sub>2</sub> O	-	-	-	-	2,734	-	-
%Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	0,114	-	-
%Perda Fogo	-	-	0,13	0,14	0,373	0,13	0,04

Fontes:

<sup>(3)</sup> LUZ e LINS, 2005.<sup>(4)</sup> KOGEL et alii, 2006.

A tabela III.5 resume as especificações granulométricas das areias industriais para as indústrias vidreiras.

Tabela III.5 – Especificações granulométricas (% retida acumulada) das areias para as indústrias vidreiras

Granulometria (mm/#Tyler)	Vidro Plano <sup>(5)</sup>	Vasos de cristal <sup>(5)</sup>	Vidro Plano <sup>(6)</sup>	Fibra de Vidro <sup>(5)</sup>
1,18 / 16	0,0	0,0	-	-
0,850 / 20	<0,01	0,0	>0,04±0,03	-
0,60 / 30	-	-	>2,61±0,96	-
0,425 / 35	<0,10	<4	-	-
0,250 / 60				<0,01
0,106 / 150	>92,0	>25	<1,76±0,20	-
0,075 / 200	>99,5	>95	<0,18±0,04	<0,6
0,045 / 325	-	-	-	>3,0

Fontes:

<sup>(5)</sup> KOGEL et alii, 2006.<sup>(6)</sup> CRUZ, 2011.

Areia industrial com teores adequados para a indústria vidreira também é vendida ao mercado de cerâmicas.

### 3.2.2.2 – Areia para fundição

As fundições usam areia industrial na manufatura de moldes para metais, tais como aço, ferro e ligas de alumínio e cobre. Os moldes se dividem em duas metades que, combinadas, formam uma cavidade na qual metal em estado líquido é vertido. Areia industrial para moldes de fundição devem geralmente exceder os 98% SiO<sub>2</sub> de pureza e há limites estabelecidos para as quantidades de CaO e MgO (KOGEL *et alii*, 2006). As especificações para algumas fundições, contudo, podem variar grandemente, dependendo de preço e disponibilidade. De modo análogo ao que ocorre com os consumidores de areia para vidro, os consumidores para fundição estão mais preocupados com a consistência da qualidade da areia.

Uma areia industrial deve ser caracterizada para se avaliar se é adequada para confecção de moldes de fundição. A caracterização envolve determinar a distribuição granulométrica, teor de partículas menores do que 0,020mm, superfície específica real, permeabilidade base, demanda de ácido, análise química e expansão por choque térmico. A partir dessas medições, determinam-se os índices derivados: módulo de finura (AFS – American Foundry Society), superfície específica teórica, o coeficiente de angularidade e outros parâmetros também importantes para caracterização de uma areia, tais como aspectos de superfície dos grãos obtidos ao microscópio eletrônico de varredura (MARIOTTO, 1981).

As principais propriedades requeridas de uma areia de quartzo para a fundição são: forma do grão, distribuição granulométrica, permeabilidade, ponto de sinterização e composição mineralógica. Na tabela III.6 encontram-se as especificações de uma areia-padrão para ensaios de fundição, de acordo com norma da ABNT.

Tabela III.6 – Especificações de areia-padrão para testes de fundição (ABNT – NBR 12672)

Características	Valor
Teor de umidade (%)	0,1 máx
Teor de SiO <sub>2</sub> (%)	>99,0
Teor de argila total (%)	0,1 máx
Superfície específica teórica (cm <sup>2</sup> /g)	95 - 107
Coefficiente de angularidade	1,20 - 1,40
Índice de Finura	55 - 61
Valor de demanda de ácido (mL HCl 0,1N/50g areia a pH 2)	3,0 máx
Permeabilidade-base (AFS)	110 - 140
Número específico teórico de grãos (dez unidade/g)	7,0 - 10,0
Diâmetro representativo (mm)	0,188 - 0,211
Grau de afastamento (%)	10,0 - 13,0

Fonte:

ABNT 12672:1992.

O efeito do tamanho de grão na permeabilidade da areia de fundição não pode ser subestimado. Após o enchimento do molde, a permeabilidade da areia deve permanecer alta o suficiente para permitir escape de gases. Mesmo uma pequena quantidade de areia fina (<0,106mm) irá reduzir grandemente a performance da areia de fundição (KOGEL *et alii*, 2006). O número de medida de finura da AFS (American Foundry Society) é usado para descrever os resultados de uma análise granulométrica e é também um modo de calcular o diâmetro médio das partículas de areia. O número de finura de grão da AFS é aproximadamente o número de aberturas por polegada linear correspondente à peneira que permitiria a passagem de uma amostra de areia se seus grãos fossem de tamanho uniforme. É aproximadamente proporcional à área superficial por unidade de peso de areia excluindo-se qualquer argila ligante ou matriz. Para melhor caracterizar o perfil de tamanhos de um grão de areia, o número de peneiras adjacentes tendo 10% ou mais do material retido nestas deve ser considerado. Para maiores detalhes sobre o índice de finura, ver a revisão bibliográfica item 3.3.1. As tabelas III.7 e III.8 trazem algumas especificações granulométricas que incluem o índice de finura (que às vezes as próprias indústrias chamam de módulo de finura).

Tabela III.7 – Especificações granulométricas de areia para fundição, produto 40/50 – Descalvado Mineração

Peneiras ABNT		% Retida	
Malha (#Tyler)	Abert.(mm)	Mínimo	Máximo
20	0,850	-	1,0
30	0,600	-	7,0
40	0,425	20,0	45,0
50	0,300	7,0	60,0
70	0,212	15,0	25,0
100	0,150	-	10,0
140	0,106	-	5,0
200	0,075	-	1,0
270	0,053	-	0,1
Fundo	<0,053	-	-
Índice/Módulo de finura		40	50

Fonte: Descalvado Mineração – PN04.ET004 v.4 – Especificação Técnica de Fornecimento – Produto 40/50 – 21/03/2012.

Tabela III.8 – Especificações granulométricas de areia para fundição, produto 35/45 – Descalvado Mineração

Peneiras ABNT		% Retida	
Malha (#Tyler)	Abert.(mm)	Mínimo	Máximo
20	0,850	-	1,5
30	0,600	-	13,0
40	0,425	20,0	45,0
50	0,300	27,0	60,0
70	0,212	10,0	23,0
100	0,150	-	7,0
140	0,106	-	2,0
200	0,075	-	0,3
270	0,053	-	0,1
Fundo	<0,053	-	-
Índice/Módulo de finura		35	45

Fonte: Descalvado Mineração – PN04.ET001 v.4 – Especificação Técnica de Fornecimento – Produto 35/45 – 21/03/2012.

Adicionalmente ao tamanho, o formato dos grãos de areia também afeta a porosidade do molde. Alta porosidade promove a elevada resistência natural e permite a utilização de

menos ligante num molde. Quanto mais angular o grão de areia, menor a porosidade e mais baixa a resistência natural do molde. Grãos angulares também tendem a resistir a compactação; desta forma, a densidade dos moldes são 8% a 10% menores que para grãos arredondados (ZDUNCZYK e LINKOUS, 1994).

### 3.2.2.3 – Sílica de quartzo finamente moída

Sílica de quartzo finamente moída (1-10 $\mu$ m), também chamada “PV”, é usada como enchimento funcional e extensor em muitas aplicações industriais, incluindo tintas e recobrimentos, vedantes e selantes, compostos baseados em epóxi, fundição de precisão e borracha sintética (KOGEL *et alii*, 2006) (LUZ e LINS, 2005). Sílica finamente moída (PV) é um componente essencial da formulação do esmalte e da massa de todos os tipos de produtos cerâmicos, incluindo louças de cozinha e mesa, louças sanitárias, pisos e revestimentos cerâmicos, cerâmica elétrica, vidrados/fritas, cadinhos de porcelana. No corpo cerâmico, a sílica é a estrutura de esqueleto na qual argilas e fluxantes se conectam. As contribuições do SiO<sub>2</sub> são: modificar a expansão térmica, regular secagem e encolhimento, melhorar a integridade estrutural e a aparência. Produtos de sílica finamente moída também são utilizados como agregados primários em refratários para prover resistência em alta temperatura a ataques ácidos em fornos industriais.

O termo sílica finamente moída (PV) abrange dois grupos de produtos: sílica em farinha (*flour silica*) e sílica moída. Sílica em farinha é geralmente vendida em mercados de valor mais baixo, enquanto sílica moída é geralmente vendida em mercados de valor mais alto. As tabelas III.9 e III.10 mostram especificações para estes produtos.

Tabela III.9 – Especificações gerais para sílica finamente moída (PV)

Características	Especificação
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,10
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,38
%Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,10
%K <sub>2</sub> O	≤ 0,10
%Retida Acumulada >0,250mm	0
%Retida Acumulada >0,075mm	≤ 1
%Retida Acumulada >0,045mm	≤ 3

Fonte:

KOGEL et alii, 2006.

Tabela III.10 – Especificações típicas europeias e norte-americanas para corpos cerâmicos

Características	Grau Sibelco Millisil M82	Sílica americana Grau 250 Ottawa, IL
%SiO <sub>2</sub>	99,5	99,8
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,017
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,055
%TiO <sub>2</sub>	0,025	0,015
%K <sub>2</sub> O + %Na <sub>2</sub> O	0,15	-
%CaO + %MgO	0,03	<0,02
%Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3ppm	1,009
Perda ao Fogo	0,1	0,1
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,95	1,009
Densidade	2,65	-
Absorção de óleo (g/100g)	17	20
Tamanho médio (µm)	20	9,5

Fonte:

LUZ e LINS, 2005.

Sílica finamente moída pode ter sua superfície quimicamente tratada, ou não, para ser usada como enchimento funcional para modificar as propriedades físicas de um produto, alterando, por exemplo, suas características térmicas. Nas tintas, sílica finamente moída é usada numa gama de produtos para aumentar sua durabilidade, melhorar sua resistência a intempéries e como extensor de pigmentos. Estes podem agregar grande valor aos consumidores de sílica, por substituírem parcialmente

pigmentos caros, tais como o dióxido de titânio. Fabricantes de tintas selecionam produtos de tamanho micrométrico para melhorar a aparência e durabilidade de tintas e recobrimentos arquitetônicos e estruturais. Sílica de alta pureza contribui de forma crítica para a melhoria de propriedades tais como brilho e refletância, consistência de cor, e absorção de óleo. Em tintas arquitetônicas, enchimentos de sílica melhoram a retenção de tom, durabilidade e resistência à sujeira, mofo, rachaduras, e intempéries. Baixa absorção de óleo permite maior carga de pigmentos para melhorar a cor de acabamento. Em coberturas marinhas e de manutenção, a durabilidade da sílica aumenta a resistência à corrosão e abrasão. Em plásticos, sílica finamente moída confere propriedades dielétricas e melhora a força do produto final. Também é valorizada por sua composição não-reativa e estável, sendo usada como enchimento inerte. As tabelas III.11 e III.12 mostram especificações de sílica finamente moída e de *tripoli* usado em tintas.

Sílica finamente moída também é usada como matéria-prima de produtos químicos. Estes produtos baseados em silício são a raiz de milhares de aplicações diárias, variando de processamento de comida a sabão e produção de corantes. Sílica finamente moída é o componente principal na produção de silicato de sódio, tetracloreto de silício e géis de silício. Estes produtos químicos são usados na limpeza doméstica e industrial, na manufatura de produtos de fibra óptica e para remover impurezas de industrialização de óleos e fermentação de bebidas.

Tabela III.11 – Especificações típicas de sílica farinha (*flour*) para esmalte (*enamel*) e esmalte vitrificado (*glaze*)

Características	Sibelco Millisil M300 (esmalte cerâmico-enamel)	Sílica americana Grau 75 – Depósito de Mappleton (esmalte vitrificado)
%SiO <sub>2</sub>	99,5	99,6
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,035
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,11
%TiO <sub>2</sub>	0,025	0,023
%K <sub>2</sub> O + %Na <sub>2</sub> O	0,15	-
%CaO + %MgO	0,03	0,016
%Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3ppm	-
Perda ao Fogo	0,1	0,2
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,85	0,897
Densidade	2,65	-
Absorção de óleo (g/100g)	19,5	23
Tamanho médio (µm)	10	6,7
Peneira de controle (>40µm)	3% máx.	-

Fonte:

LUZ e LINS, 2005.

Tabela III.12 – Especificações de *tripoli* usada nas indústrias de plástico, tinta e borracha

Características	Especificação
%SiO <sub>2</sub>	99,5±0,5
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,025
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,009
%TiO <sub>2</sub>	0,005
%CaO	0,15
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,65
Índice de refração	1,54 - 1,66
Resistência específica (ohms)	25700
Alvura GE (%)	84 - 91
pH	7
Ponto de fusão (°C)	1722

Fonte:

LUZ e LINS, 2005.

#### 3.2.2.4 – Abrasivos

Areias industriais têm grande mercado como abrasivos (KOGEL *et alii*, 2006). São usadas para limpar superfícies, sendo valorizadas por seu relativo preço baixo, capacidade de corte, usabilidade em jateamento e disponibilidade. Areia abrasiva de alta qualidade deve ser livre de impurezas como carbonatos, nitrato de sódio, orgânicos, e minerais de silicato de alumínio. As impurezas afetam grandemente a performance reduzindo a capacidade de corte da areia, gerando um jato não-uniforme ou criando poeira. Muitos consumidores preferem areia com grãos angulares.

Grau de abrasividade é base para critérios de aplicabilidade. Areias mais grosseiras eram primariamente usadas para jateamento em larga escala de estruturas metálicas e para remoção de coberturas espessas indesejadas de superfícies. Hoje, no Brasil, nas operações de jateamento abrasivo, é proibido o uso de areia, conforme a Portaria no 99, de 19 de outubro de 2004, do Ministério do Trabalho e Emprego (KULCSAR NETO, 2010). Reciprocamente, areias mais finas são usadas para polimento de superfícies e limpeza de ligas mais macias como bronze e alumínio. Areias industriais são utilizadas pela indústria de vestuário para lavagem à pedra (*stone washing*) de jeans. Também é usada na fabricação de saponáceas e no polimento de vidros e rochas (LUZ e LINS, 2005).

O mercado de abrasivos é altamente competitivo e os consumidores são conhecedores dos preços, frequentemente aceitando mais baixa qualidade por um melhor preço. Adicionalmente, preocupação com sílica respirável é um problema frequente no mercado de abrasivos, sendo proibido o uso de abrasivos compostos por sílica no jateamento, deixando espaço para outros abrasivos como granalha de aço, granada, alumina fundida, cascas de nozes, os quais não contêm sílica cristalina. Apesar de a poeira respirável poder ser mitigada com tratamento superficial da areia industrial de jateamento com surfactantes químicos, os produtores não conseguiram mitigar totalmente as preocupações com sílica respirável.

### 3.2.2.5 – Fraturamento hidráulico

Areia industrial (areia propante) é bombeada para dentro de furos em poços profundos, para sustentação de fissuras, aumentando o fluxo de gás natural ou petróleo, num processo denominado fraturamento hidráulico. A figura III.4 mostra o procedimento esquemático de uma operação de fraturamento hidráulico.

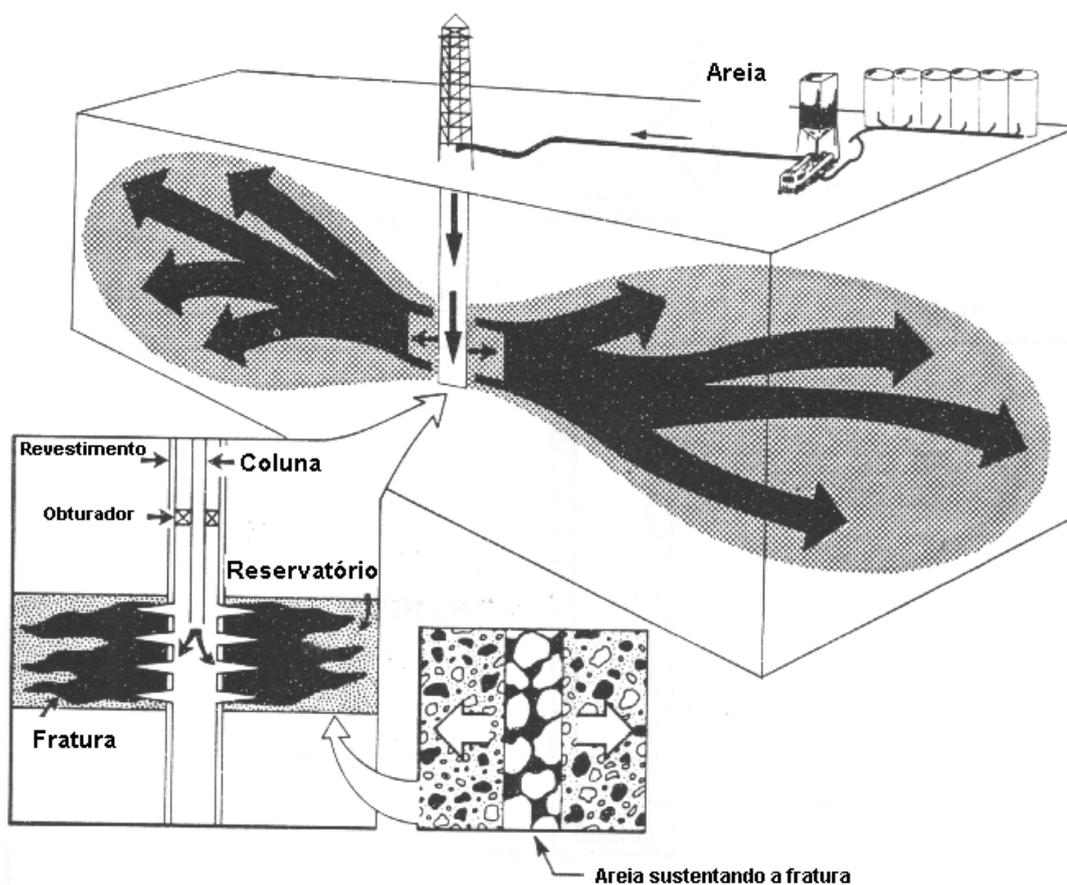


Figura III.4 – Procedimento esquemático de uma operação de fraturamento hidráulico. Injeção de fluido a alta pressão na formação e a abertura de um plano de fratura (CASTRO, 2004).

Areias propantes são geralmente adicionadas aos poços dentro da zona viável destes, para melhorarem a condutividade dos mesmos. A condutividade de um poço é a soma da permeabilidade do propante multiplicada pela abertura sustentada das fissuras. As areias propantes, utilizadas no fraturamento hidráulico, são categorizadas segundo a tensão que podem suportar e pelo tamanho de grãos em malhas (KOGEL *et alii*, 2006). O tamanho da partícula é importante para a performance porque o tamanho é uma

medida relativa da resistência à compressão. Quanto menor a porosidade da areia propante (menor tamanho de grão), mais área de contato é disponível para suportar a compressão. Portanto, areias mais grosseiras têm menor resistência à compressão que areias mais finas. As especificações da areia de fraturamento são de responsabilidade do American Petroleum Institute (API) nos EUA e o padrão atual é API RP 56.

A tabela III.13 mostra uma classificação de propantes segundo sua faixa de resistência à compressão.

Tabela III.13 – Faixa de resistência a compressão de propantes

Propante	Faixa de resistência a compressão, psig	Faixa de resistência a compressão, MPa
Areia Classe C	0 - 4000	0 - 27579
Areia Classe D	0 - 5000	0 - 34474
Areia Classe E	2000 - 6000	13790 - 41369
Areias com superfície modificada por resina	4000 - 12000	27579 - 82737
Cerâmicas	10000 - 16000	68948 - 110316

Fonte:

KOGEL *et alii*, 2006.

As areias propantes podem ser de superfície modificada (por cobertura com resina) ou não. As areias de maior valor são limpas, relativamente sem poeira, e de grãos arredondados, exibindo uma melhor permeabilidade sob a compressão de fechamento de um poço. As especificações restritivas para areias de fraturamento, especialmente em relação ao arredondamento e à esfericidade, tornam muitos depósitos impróprios para produção desse tipo de areia (ZDUNCZYK, 2007). Sob uma mesma taxa de compressão, areias mais grosseiras são mais permeáveis que areias mais finas. A dureza (resistência à compressão) e a integridade estrutural das areias de sílica se combinam para fornecer a requerida resistência a esmagamento sob as pressões presentes em poços com até 2450m de profundidade. Sua relativa inatividade química é requerida para resistir aos ataques químicos nos ambientes corrosivos encontrados dentro dos poços de petróleo e gás natural.

Algumas especificações para a areia de quartzo ser usada no fraturamento hidráulico de formações contendo óleo ou gás são esfericidade, granulometria entre 20 e 40 malhas (0,84mm a 0,42mm), ser livre de alguns materiais tais como feldspato, calcita, argilas, etc. Os padrões preparados pela API neste sentido simplesmente estimam o quanto os grãos de quartzo se aproximam de uma forma esférica e seu arredondamento relativo. KRUMBLEIN e SLOSS conceberam em 1955 (publicado em 1963) um gráfico para a estimativa visual da esfericidade e do arredondamento, como mostrado na figura III.5. A API recomenda esfericidade e arredondamento de 0,6 ou mais.

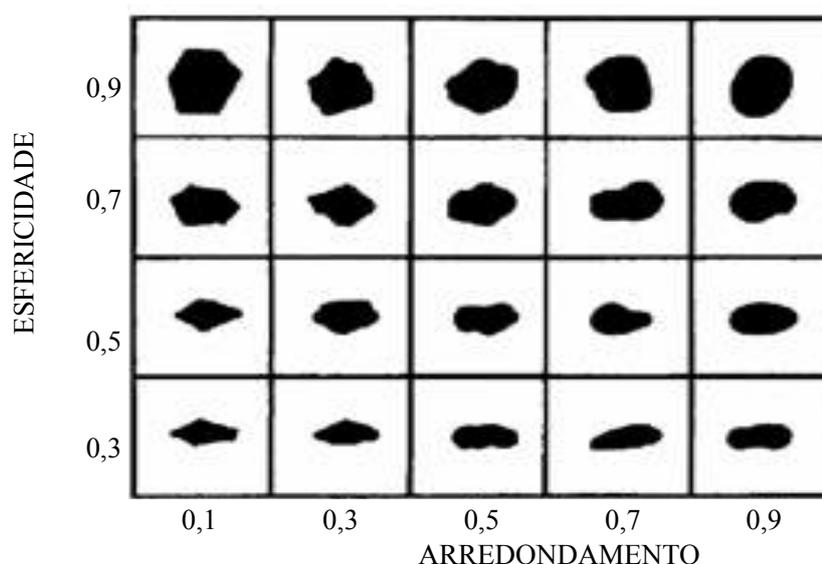


Figura III.5 – Gráfico para estimativa visual de esfericidade e arredondamento, segundo KRUMBEIN e SLOSS, 1963.

Na tabela III.14 encontram-se as especificações de areia de quartzo usada no fraturamento de formações contendo petróleo, nos campos de Taquipe, município de São Sebastião do Passé – BA.

Tabela III.14 – Distribuição granulométrica de uma areia usada para fraturamento hidráulico nos campos de petróleo de Taquipe – BA

Abertura peneira, mesh Tyler	% Peso	% Peso acumulado acima
14	11,99	11,99
20	82,91	94,90
28	4,75	99,65
<28	0,35	100,00

Fonte:

LUZ e LINS, 2005.

### 3.2.2.6 – Filtração

Para esta finalidade, as areias são usadas no preparo de leitos (filtros) destinados à filtragem e purificação de águas e efluentes industriais. A areia para filtração deve ser isenta de impurezas (argilas, pó, materiais micáceos ou orgânicos). Não há restrições ao formato dos grãos, no entanto é desejável que não sejam alongados ou planos. Grãos angulares ou arredondados propiciam porosidade e permeabilidades adequadas aos leitos de filtração. Grãos arredondados são valorizados por sua permitir maiores vazões, enquanto grãos angulares são valorizados por sua habilidade de reter sólidos. Contudo, se os grãos forem angulares demais, eles podem comatar o meio filtrante, inibindo o fluxo. A areia deve apresentar tamanho uniforme e estar distribuída em faixas granulométricas estreitas.

Diferentemente de outros usos, a granulometria de areia para filtração é mais grosseira, tipicamente entre 1,0 e 0,5 mm (LUZ e LINS, 2005). São duas as especificações que uma areia para filtração deve atender: tamanho médio dos grãos e uniformidade (KOGEL *et alii*, 2006). O tamanho efetivo da areia é definido como a abertura na qual passa apenas 10%, em peso, de amostra representativa de uma areia. Define-se o coeficiente de uniformidade de uma areia destinada à filtração como a relação entre o tamanho da abertura de peneira na qual passa 60% em peso de uma amostra representativa e o tamanho da abertura na qual passa 10% em peso dessa mesma amostra (tamanho efetivo). Na tabela III.15 constam as especificações de uma areia para

filtração.

Tabela III.15 – Granulometria típica e composição química de uma areia para filtração

Tamanho, mm	Coefficiente de uniformidade
0,4 a 0,5	1,60 máx.
0,5 a 0,6	1,60 máx.
0,6 a 0,7	1,60 máx.
0,7 a 0,8	1,60 máx.
0,8 a 1,0	1,65 máx.
1,0 a 1,5	1,70 máx.
Composição Química	
%SiO <sub>2</sub>	99,39
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,24
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,19
%TiO <sub>2</sub>	0,12
%CaO	0,01
%MgO	0,004
Perda ao fogo	0,046

Solubilidade ácida (HCl 1:1) 0,08% - 0,11%.

Peso específico 2,64 - 2,66.

Fonte:

KOGEL et alii, 2006.

### 3.3 – Análises

Para caracterizar as amostras, diversas análises foram necessárias. São revistos aqui os aspectos mais importantes de cada metodologia de análise.

#### 3.3.1 – Análises granulométrica e químicas

As amostras foram submetidas a análises granulométricas e químicas, utilizando os serviços do laboratório SGS Lakefield Geosol.

Para cada fração granulométrica foram analisados: %SiO<sub>2</sub>, %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %CaO, %MgO, %TiO<sub>2</sub>, %P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, %Na<sub>2</sub>O, %K<sub>2</sub>O, %MnO, %PPC (perda por calcinação ou perda ao fogo, que são as perdas de massa a uma temperatura de 1000°C).

As análises dos óxidos supracitados foram realizadas por fluorescência de raios-X, método da pastilha fundida.

A análise multielementar instrumental por fluorescência de raios-X (XRF) é baseada na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitada. Até 1966 a XRF era realizada unicamente por espectrômetros por dispersão por comprimento de onda (WD-XRF, abreviação de *wavelength-dispersive X-ray fluorescence*), mais comumente denominada WDS, baseados na lei de Bragg. Com o desenvolvimento do detector semicondutor de Si(Li), capaz de discriminar raios-X de energias próximas, foi possível o surgimento da fluorescência de raios-X por dispersão de energia (ED-XRF, *energy-dispersive X-ray fluorescence*), também conhecida como EDS, com instrumentação menos dispendiosa e emprego mais prático (BRANDÃO, 2013). A técnica de EDS tem sido muito usada nos últimos anos, tanto para análise qualitativa quanto para quantitativa, podendo atingir limites de detecção da ordem de 1 a 20ppm para amostras sólidas (sem tratamento químico) e da ordem de 1 a 20ppb para amostras líquidas (com tratamento de pré-concentração). Contudo, o método EDS tem limite de detecção bem pior que o WDS para elementos com número atômico menor que o sódio ( $Z=11$ ).

A análise por fluorescência de raios-X é um método quali-quantitativo baseado na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra (BOUMANS, 1989; IAEA, 1970). Os raios-X emitidos excitam os elementos que constituem a amostra, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra.

Quando um elemento de uma amostra é excitado, seus elétrons passam a ocupar um subnível eletrônico de maior energia e, quando retornam ao seu subnível inicial, emitem fótons de energia característica e bem definida para cada elemento. Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios-X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão radiação característica emitida pela

amostra, e detecção desta radiação (VAN GRIEKEN e MARKOWICZ, 2002).

### *Índice de Finura*

O índice de finura (algumas vezes também denominado pela indústria módulo de finura) é uma terminologia adotada pela indústria de fundição para as areias usadas nos moldes perdidos. Ele é obtido pela multiplicação do valor retido em cada peneira de uma série específica por um fator multiplicativo, de tal forma que quanto maior o índice de finura, mais fina será a areia. Ou seja, é uma referência da indústria de fundição, vidros e argamassas/concreto (construção civil) para a finura das areias com base na distribuição granulométrica.

Com base nas análises granulométricas, é calculado o índice de finura (RUBIO e NOGUEIRA, 2000):

- Multiplicam-se as porcentagens retidas em cada peneira pelos coeficientes (os coeficientes são números arbitrários de valor aproximado ao número de malhas da peneira contígua anterior).
- Somam-se as parcelas obtidas do produto de cada porcentagem retida pelo seu coeficiente.
- Divide-se o resultado desta soma pela soma do material retido. O resultado, dado em unidades, é o índice de finura.

Tabela III.16 – Tabela para cálculo do índice de finura (segundo RUBIO e NOGUEIRA, 2000)

NÚMERO DA PENEIRA ABNT	PESO GRAMAS	%	FATOR	% X FATOR
6	XXXXXXXX	XXXXXXXX	3	XXXXXXXXXX
12	XXXXXXXX	XXXXXXXX	5	XXXXXXXXXX
20			10	
30			20	
40			30	
50			40	
70			50	
100			70	
140			100	
200			140	
270			200	
PRATO			300	
TOTAL			-	

### 3.3.2 – Difração de raios-X

A descoberta dos raios-X se deu a partir de experimentos com os “tubos catódicos”. O físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen passou a estudar os chamados “raios catódicos” em 1894, e no ano seguinte começou a observar a radiação que chamaria de “Raios-X”, por sua natureza desconhecida. Descobriu suas principais propriedades, como a propagação em linha reta, alta capacidade de penetração, indiferença a campos magnéticos e capacidade de impressionar chapas fotográficas. Tais propriedades ora aconteciam com a luz, ora com os “raios catódicos”. Tentativas de verificar reflexão, refração ou difração foram feitas, sem sucesso. Assim, Röntgen supôs que era algo diferente de todas as radiações conhecidas, chegando a sugerir que fossem ondas eletromagnéticas longitudinais (BLEICHER e SASAKI, 2000).

Após os estudos da radiação, Röntgen publicou um trabalho sobre a nova radiação e enviou separatas do artigo para vários cientistas influentes da época, acompanhadas de algumas radiografias.

O estudo da difração dos raios-X em cristais se deu com Max von Laue a partir de 1912, quando este cientista esteve discutindo aspectos da propagação da luz em cristais com P. P. Ewald, que estava desenvolvendo sua tese de doutorado sobre o assunto. Chamou

a atenção de Laue o modelo teórico de Ewald para os cristais, que consistia em pequenos osciladores espaçados periodicamente em três dimensões, com distâncias da ordem de  $10^{-8}$  cm. Dos experimentos de Röntgen, Laue sabia que o comprimento de onda dos raios-X era dessa ordem. Logo, um cristal serviria como uma grade ideal para a difração dos raios-X. Experimentos foram feitos para detectar o fenômeno, e em 1912 Laue conseguiu obter o primeiro diagrama de difração, utilizando o sulfato de cobre. Aplicando seus conhecimentos sobre a difração da luz por grades de uma e duas dimensões, Laue formulou uma teoria de difração de raios-X para estruturas tridimensionais (cristais), obtendo assim o prêmio Nobel de Física em 1914.

Quando os raios-X incidem num cristal, ocorre o espalhamento e conseqüentemente a difração dos raios-X. Ocorre tanto o espalhamento coerente (colisão elástica) quanto o incoerente (com perda de energia por Efeito Compton, colisão inelástica). O espalhamento coerente com interferência construtiva das ondas segue a Lei de Bragg, equação III.1 (KLEIN e HURLBUT JR, 1992).

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

Equação III.1 – Lei de Bragg, onde:  $\theta$  é o ângulo de incidência do feixe de radiação,  $d$  é a distância entre os planos cristalinos da substância bombardeada por raios-X,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação incidente e  $n$  é a ordem da difração.

A figura III.6 ilustra o fenômeno.

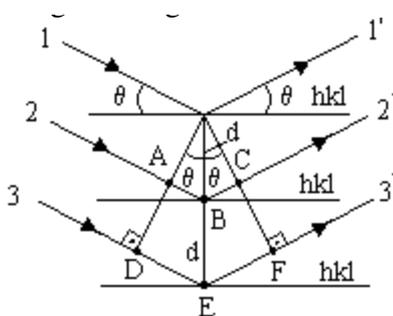


Figura III.6 – Interferência entre raios (setas na figura) e os planos cristalinos (linhas horizontais) de uma substância, seguindo a Lei de Bragg.

O difratômetro é construído de tal forma que os raios-X incidem sobre uma amostra em pó (Método do Pó), variando-se continuamente o ângulo  $\theta$ . Quando a Lei de Bragg é obedecida, ocorrem picos de intensidade detectáveis. Estes picos detectáveis formam um padrão de difração (difratograma), como o da figura III.7.

O padrão de difração de uma substância cristalina (difratograma) é único para cada tipo de cristal, inclusive para os minerais. Conhecendo-se o padrão de difração de um determinado mineral, pode-se determinar a sua presença em uma amostra por difração de raios-X, bem como se ter uma avaliação de sua abundância relativa aos demais minerais presentes na amostra, como foi feito para este trabalho.

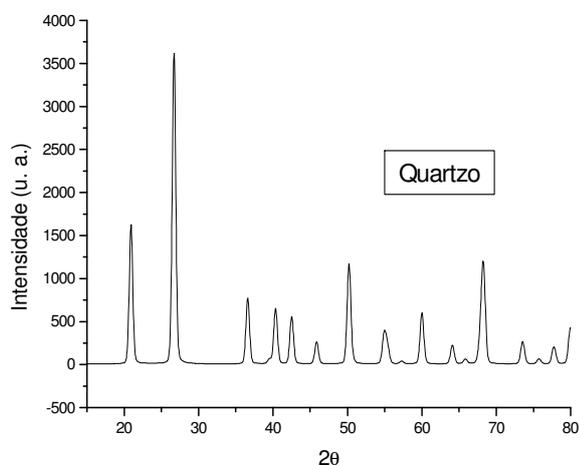


Figura III.7 – Padrão de difração de pó (difratograma) do quartzo.

### 3.3.3 – Exame sob MEV-EDS

A utilização de microscopia eletrônica de varredura (MEV) demonstra a possibilidade de visualização de imagens com alta ampliação (até 300.000X) e resolução, permitindo a observação e registro de imagens tridimensionais (GOLDSTEIN *et alii*, 1992).

As imagens fornecidas pelo MEV possuem caráter virtual, sendo visualizadas em um monitor através da transcodificação da energia emitida pelos elétrons (GOLDSTEIN *et alii*, 1992).

O espectrômetro por dispersão de energia (EDS) acoplado ao MEV permite análises químicas elementares semiquantitativas por fluorescência de raios-X, em áreas selecionados da amostra, permitindo avaliar a composição química pontual nestas áreas (GOLDSTEIN *et alii*, 1992)

### 3.4 – Testes de processamento

Nas porções medianas da Formação Taboões, encontram-se tão somente quartzitos intemperizados, de altos teores de sílica, apresentando essencialmente quartzo e uma assembleia de minerais singenéticos à deposição: hematitas, goethitas e minerais de ferro em geral, e quantidades muito pequenas de argilominerais micáceos, normalmente se apresentando como argilas oriundas do intemperismo (LADEIRA, 1984).

Já nas porções mais próximas ao contato dos quartzitos com os filitos, uma de suas rochas encaixantes, tem-se a presença de filitos em meio aos quartzitos. Isto resulta em uma mistura que dilui a sílica, cujo teor é um dos mais importantes, quando se considera o uso de quartzito como matéria-prima pela indústria. Além de diluir a sílica, a presença de filitos aumenta os teores de alumina, considerada composto indesejável para os usos industriais de matérias-primas silicatadas (COELHO, 2010).

Desta forma, estabelecer métodos e rotas de processo para separar os argilominerais, oriundos de filitos ou do intemperismo de micas, da sílica se torna muito importante, tanto em termos de aproveitamento racional dos recursos minerais quanto em termos econômicos.

As metodologias selecionadas para remoção das contaminações da sílica neste projeto foram atrição/escrubagem e separação magnética de alta intensidade.

#### 3.4.1 – Testes de escrubagem/atrição

Para separação da substância de interesse do quartzito, o quartzo, dos minerais de

ganga, primeiramente é preciso eliminar o recobrimento de lamelas existente sobre as partículas de quartzo. Em sistemas minerais em que há partículas de tamanho maior em meio a partículas de tamanho muito pequeno, há tendência da formação de *slimes coating*, como está ocorrendo neste sistema de quartzo e argilominerais finos.

Decidiu-se iniciar os estudos de separação entre as partículas de quartzo e as partículas que formam seu recobrimento de argilominerais usando atrição da amostra em meio aquoso, com auxílio de dispersantes. Os dispersantes atuam no sentido de provocar o aumento da repulsão elétrica entre as partículas, aumentando a carga da dupla camada elétrica em função da adsorção na superfície das partículas por ligações de hidrogênio ou outro tipo de adsorção química (BRANDÃO, 2012).

#### *Dispersão com ácido cítrico*

O ácido cítrico, cuja nomenclatura IUPAC é ácido 2-hidroxi-1,2,3-propano tricarbóxico (BOYD, 1990), tem a fórmula estrutural da figura III.8, com representação espacial na figura III.9.

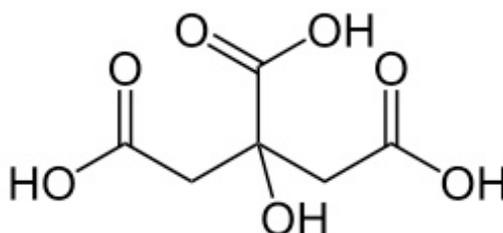


Figura III.8 – Fórmula estrutural planar do ácido cítrico.

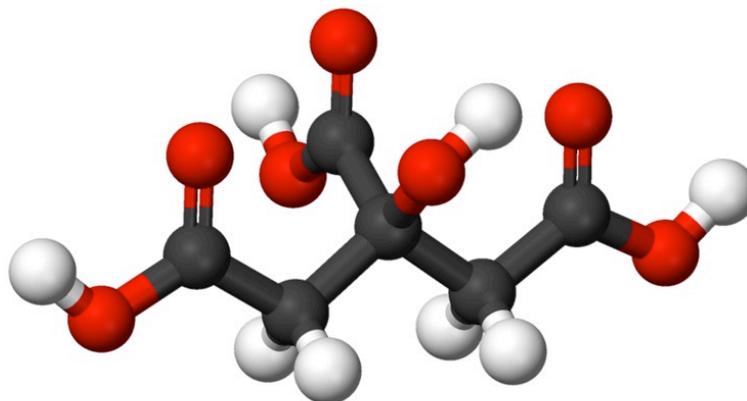


Figura III.9 – Representação espacial da estrutura do ácido cítrico.

Os mecanismos da dispersão utilizando ácido cítrico se baseiam no fato de que ele apresenta a estrutura química ideal para um dispersante em meio aquoso: por ionização, uma ou mais carboxilas se adsorvem nas partículas, criando uma carga elétrica interfacial média a alta, orientando uma ou mais hidroxilas para a solução, portanto, com a participação também da solvatação.

A adsorção da carboxila é específica, na qual os íons adsorvidos especificamente são ligados, mesmo que temporariamente, à superfície por forças eletrostáticas e/ou de van der Waals, com força suficiente para superar a agitação térmica (JENNE, 1998). O centro de qualquer íon adsorvido especificamente se localiza na camada de Stern, i.e., entre o plano de Stern e a superfície da partícula (SHAW, 1992).

A agitação da polpa tem como função fornecer energia para atrição e permitir a atuação do ácido cítrico na superfície das partículas de quartzo e de argilominerais presentes. O ácido cítrico adsorve-se especificamente na superfície do quartzo (KUBICKI *et alii*, 1999), e também nos argilominerais devido à presença de alumina (HIDBER *et alii*, 1996; WANG, 2007; SOARES, 2009).

GAN *et alii* (2009) estudaram a atuação do ácido cítrico como dispersante de quartzo e concluíram que ele atua aumentando a carga interfacial negativa na partículas de quartzo, possibilitando a dispersão. Isto, a despeito da carga superficial do quartzo e

meio aquoso ser sempre negativa em pH acima de três na temperatura ambiente acima de 10°C (RAMACHANDRAN, 1986).

Os argilominerais presentes na amostra têm sempre um componente majoritário de alumina. HIDBER *et alii* (1996) caracterizaram a interação entre o ácido cítrico e a alumina em solução aquosa. Demonstraram que a máxima adsorção de ácido cítrico em alumina ocorre em pH 3, decrescendo até a metade em pH 8. Discutiram a interação potencial entre as partículas com base na teoria Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO). Esta interação é determinada pelo citrato adsorvido na superfície, levando a uma carga negativa na superfície e pelos ânions citrato permanecendo em solução, resultando em aumento da força iônica. Nos testes realizado por estes autores, a adsorção do ácido cítrico também criou uma barreira estérica que inibiu a aproximação mútua completa entre as partículas individuais de alumina.

#### *Dispersão com silicato de sódio*

O silicato de sódio é constituído por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). A variação da relação ponderal entre os óxidos constituintes e o teor de sólidos da solução gera produtos com especificações variadas, e com características específicas para cada utilização nos diversos segmentos de mercado.

Por apresentar fácil manipulação, ser atóxico e não inflamável, é um produto químico com ampla aplicação, além de destacar-se como substituto em formulações e processos que procuram alternativas ecologicamente corretas.

A sua produção baseia-se na fusão alcalina em alta temperatura a partir do carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e de areia silicosa ( $\text{SiO}_2$ ). As proporções dos constituintes ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ) no produto final são dependentes da etapa de dosagem realizada inicialmente na preparação da mistura (SILVA, 2011).

O silicato de sódio é classificado como reagente modificador e desempenha diferentes funções no processo como: depressor, dispersante, regulador de pH, etc. É,

provavelmente, um produto químico amplamente utilizado industrialmente devido às suas propriedades originais como: estabilidade química, viscosidade, capacidade de polimerização, modificador de cargas superficiais, etc., e tem sido empregado nos mais diversos campos, dentre os quais na flotação de minérios como reagente modificador.

A ação do silicato de sódio como dispersante é associada, principalmente, com a dissociação do ácido polissilícico, que se ioniza, parcialmente, em solução aquosa. Sua adsorção provoca um aumento da carga negativa do sólido e, conseqüentemente, a estabilização do sistema mineral. A dispersão ocorre devido ao aumento do valor negativo do potencial zeta e das camadas hidratadas na superfície mineral (BULATOVIC, 2007).

GREEN e COLOMBO (1984) realizaram testes de deslamagem com três taconitos, um dos quais, denominado amostra A, tinha teor de MgO similares aos da amostra SJB01 deste estudo e sílica de 43,5% e 35,7% Fe. O gráfico da figura III.9, extraído do trabalho destes autores, mostra o aumento do percentual de lamas dispersas segundo aumento da dosagem de silicato de sódio e de hidróxido de sódio.

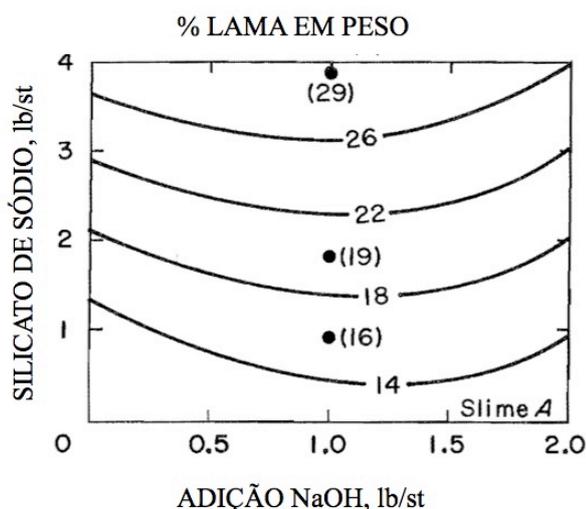


Figura III.10 – Diagrama de superfície de resposta, sistema silicato/hidróxido, para percentagens de lamas (*slimes*) para amostra A de taconito. 1lb/st = 500g/t.

Da figura III.10 depreende-se que há um aumento gradual na dispersão do sistema e, conseqüentemente, do percentual de lamas dispersas obtido quando se aumenta a

dosagem de silicato de sódio, para uma mesma dosagem de hidróxido de sódio.

#### *Dispersão com hidróxido de sódio*

O uso de hidróxido de sódio para aumentar o grau de dispersão em sistemas contendo quartzo e minerais de ferro não é novidade. GREEN e COLOMBO (1984) usaram em taconitos o hidróxido de sódio como dispersante e afirmam que este reagente aumenta a negatividade das partículas minerais de tal forma que as forças de repulsão agindo entre elas impedem a floculação natural e a sedimentação.

CASTRO (2012) estabeleceu a curva da figura III.11 para a dispersão de um sistema composto por lamas da Samarco Mineração, contendo minerais de ferro (hematitas, limonitas) e quartzo, sob efeito do dispersante hidróxido de sódio.

O grau de dispersão mostrou-se extremamente sensível a aumentos de pH, na faixa compreendida entre 8,75 e 9,5. Observou-se um menor gradiente de aumento do grau de dispersão na faixa compreendida entre 9,5 e 10,5, ocorrendo em pH igual a 10,5 o grau máximo de dispersão. Valores superiores a 10,5 mostraram uma diminuição do grau de dispersão. Este comportamento pode ser explicado pelo fato da hidroxila, mesmo sendo aniônica, se adsorver especificamente ao substrato das partículas negativas de quartzo e hematita, aumentando a carga elétrica negativa e promovendo maior dispersão do sistema. Quando se aumenta ainda mais a concentração de hidroxila, os sítios reativos à espécie dispersante se esgotam, cessando a adsorção específica. Adições a mais do “dispersante” agora ficam no seio da solução, atuando apenas como espécies indiferentes, o que provocará uma compactação da camada difusa, e inevitavelmente, uma diminuição do grau de dispersão (BRANDÃO, 2012).

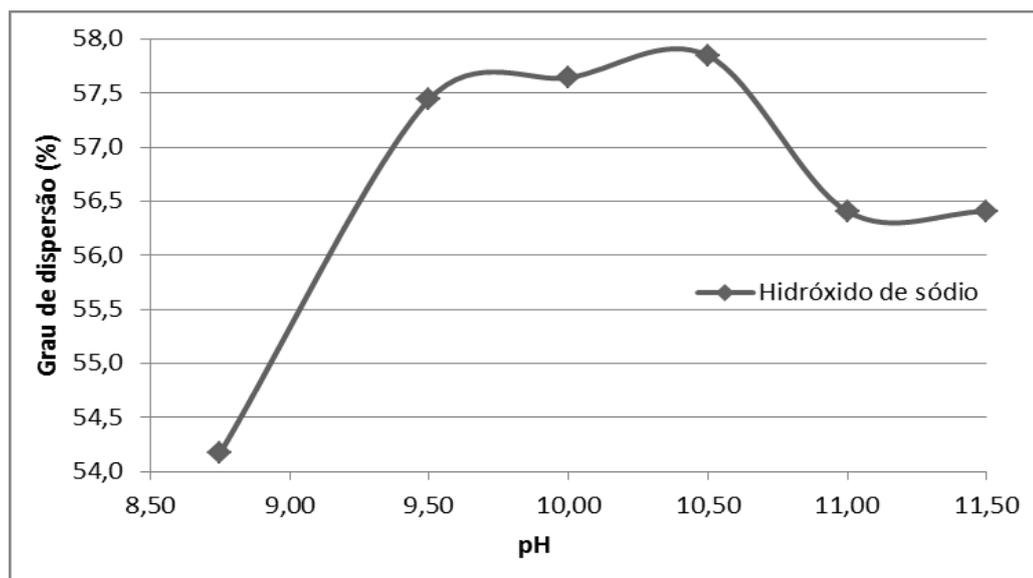


Figura III.11 – Grau de dispersão em função de pH para o sistema estudado por CASTRO (2012).

#### 3.4.2 – Testes de separação magnética

A separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para a concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais, utilizando como propriedade diferenciadora o comportamento das partículas minerais sob a ação de um campo magnético.

A propriedade de um material que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade os materiais ou minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso têm-se os minerais ferromagnéticos, os quais são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. Aqueles que são repelidos pelo campo denominam-se diamagnéticos. A separação magnética pode ser feita tanto a seco quanto a úmido. O método a seco é usado, em geral, para granulometria grossa e o a úmido para aquelas mais finas (SAMPAIO e LUZ, 2004)

Segundo a susceptibilidade magnética, os minerais podem ser divididos em (LAGE, 2010):

- Minerais ferromagnéticos: São minerais atraídos fortemente por campo magnético. Ex. magnetita
- Minerais paramagnéticos: São minerais atraídos fracamente por campo magnético. Ex. hematita, cromita, etc.
- Minerais diamagnéticos: São minerais repelidos por campo magnético. Ex. quartzo, cerussita, calcita, etc.

#### *Separador Magnético a Úmido de Alta Intensidade (WHIMS) para Laboratório*

O desenvolvimento da separação magnética tomou grandes dimensões com o advento das matrizes ferromagnéticas e, como consequência, a fabricação do separador Jones. Devido ao sistema de matrizes e a grande eficiência da separação nas faixas granulométricas finas, o equipamento proporciona vantagens significativas comparado aos demais. A sua aplicação, devido à operação sempre com alta intensidade, restringe-se, em geral, aos minerais paramagnéticos.

A operação do separador magnético a úmido de alta intensidade para laboratório pode ser descrita da seguinte forma (adaptado de SAMPAIO e LUZ, 2004). Primeiro, um elevado campo magnético é aplicado nas matrizes. As matrizes são sulcadas a fim de que as forças magnéticas sejam máximas no interior das mesmas. A alimentação da polpa mineral é feita, deixando passar somente as partículas não-magnéticas, que são descarregadas em um recipiente coletor. Em seguida, um fluxo de água é passado na matriz, para permitir que partículas não-magnéticas que por ventura foram aprisionadas por partículas atraídas pelo campo tenham chance de sair. Na terceira e última fase da operação, o campo magnético é desligado, iniciando a lavagem do concentrado com o fluxo de água, permitindo a coleta do concentrado magnético.

## 4 – Metodologia

### 4.1 – Materiais

Os materiais estudados foram os quartzitos presentes na área da ERG Mineração em São Joaquim de Bicas – MG.

Logo após a supressão da vegetação na área de lavra e abertura das primeiras bancadas, foi feito um novo mapeamento geológico de detalhe, com uma melhor visualização e acesso às litologias. Este mapeamento revelou que existem somente dois tipos básicos de quartzito, e não quatro tipos como inicialmente pensava-se: quartzito argiloso e quartzito. A diferença fundamental entre os dois tipos é uma maior presença de micas e argilas no quartzito argiloso, contra uma virtual ausência destes no quartzito (BUENO, 2013). Mesmo o anteriormente denominado quartzito maciço se revelou ser apenas quartzito com presença de veios de quartzo mais compactos, que se desfazem com relativa facilidade sob impacto do martelo de geólogo.

Como a mudança de um litotipo para o outro ocorre de forma gradual, na medida em que se caminha para leste, afastando-se mais do contato com o filito (localizado a oeste), entrando realmente no cerne da Formação Taboões, optou-se por coletar quatro amostras, denominadas amostra SJB01 até amostra SJB04, representando a mudança gradual do quartzito argiloso para o quartzito.

Como a mineralização se apresenta ortogonalmente disposta em relação à direção de abertura das bancadas, na frente de lavra atualmente exposta, a amostragem foi conduzida na face dos taludes. A direção da amostragem foi horizontal, adotando a metodologia de amostragem de canais (*channel sampling*) para obtenção de aproximadamente 100kg por amostra coletada. A figura IV.1 mostra uma vista da bancada aberta na qual foram tomadas as amostras.



Figura IV.1 – Vista de bancada aberta na frente de lavra atualmente exposta, mostrando face do talude onde foram coletadas as amostras.

O ponto central de cada um dos canais de amostragem foi georreferenciado utilizando levantamento topográfico com estação total. Estas coordenadas geográficas estão descritas na tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Localização geográfica das amostras coletadas para estudo

Identificação	Latitude	Longitude	Cota (m)
SJB01	20° 06' 45,1" S	44° 14' 55,7" W	921
SJB02	20° 06' 45,2" S	44° 14' 55,6" W	919
SJB03	20° 06' 45,2" S	44° 14' 55,4" W	919
SJB04	20° 06' 45,1" S	44° 14' 54,9" W	920

*Datum Horizontal (Planimétrico): South America 69 (SAD69).*

*Datum Vertical (Altimétrico): Marégrafo de Imbituba – SC.*

## 4.2 – Métodos

A sequência-mestra dos ensaios da pesquisa desenvolvida é descrita a seguir.

### 4.2.1 – Preparação preliminar

As quatro amostras coletadas, adequadamente identificadas e georreferenciadas, foram peneiradas manualmente a seco em peneira de 10mm, sendo o retido submetido à quebra com marreta para destorroamento dos grânulos de quartzo aglomerados. Houve quarteamento em lona, e as amostras foram encaminhadas para análise granulométrica a úmido.

### 4.2.2 – Análises granulométricas

As amostras foram submetidas a peneiramento a úmido, nos laboratórios da SGS Lakefield Geosol, seguindo a série de peneiras da tabela IV.1, a qual abrange um grande número de peneiras das diversas especificações dos produtos potenciais. Optou-se pela análise granulométrica a úmido por ser este o método que melhor reproduz a rota de processamento mineral a úmido, a mais utilizada para areias industriais.

Cada fração retida foi seca e pesada, inclusive toda a massa passante na última peneira (0,038mm).

### 4.2.3 – Análises químicas

As frações granulométricas obtidas na etapa anterior foram submetidas a análises químicas na SGS Lakefield Geosol, por espectrometria de fluorescência de raios-X (pastilha fundida), além da determinação da perda por calcinação ou perda ao fogo. Os resultados destas análises químicas foram muito importantes para se definir o uso potencial de cada fração, identificando os contaminantes químicos da sílica, e dando uma primeira orientação sobre a(s) fração(ões) onde estes se concentram.

Tabela IV.1 – Peneiras utilizadas na análise granulométrica a úmido

Série de Peneiras	
Peneira nº	Abertura,mm
6	3,350
12	1,700
20	0,850
24	0,710
35	0,500
50	0,300
70	0,212
100	0,150
140	0,106
200	0,075
270	0,053
325	0,045
400	0,038

#### 4.2.4 – Análises instrumentais: lupa binocular

Como os objetivos deste trabalho são identificar os tipos de contaminação presentes nos quartzitos e propor rotas de processamento mineral para remover estas contaminações, optou-se por iniciar o exame com auxílio de lupa binocular. Cada fração de interesse das quatro amostras, obtidas na análise granulométrica, foi visualizada sob a lupa binocular Leica MZ6 do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia de UFMG, com aumentos variando de 10 a 40X. As imagens mais interessantes e típicas de cada fração foram fotografadas usando a câmera adaptada a esta lupa, uma Canon PowerShot S80. Foram avaliadas a forma das partículas e dos grãos, presença de incrustações, recobrimentos, minerais e rochas estranhos ao quartzito, liberação das partículas.

#### 4.2.5 – Análises instrumentais: MEV-EDS

Algumas amostras foram selecionadas para exame sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) com microanalisador de raios-X dispersivo em energia (EDS). Foi

utilizado o MEV-EDS da JEOL, modelo JSM 6360LV, com canhão de elétrons de filamento de tungstênio, com recursos de alto e baixo vácuo, do Centro de Microscopia da UFMG. O equipamento EDS foi o Thermo Noran modelo Quest, com programa analítico SpectraPlus. O objetivo foi eliminar dúvidas sobre a natureza de contaminações no quartzo e quartzito, além de obter imagens com melhor resolução da fração abaixo de 0,038mm.

As frações granulométricas mais grossas foram observadas sob a forma de secções polidas; já a fração abaixo de 0,038mm foi analisada como partículas dispersas.

#### 4.2.6 – Análises instrumentais: difração de raios-X (DRX)

As amostras selecionadas foram submetidas então à análise por difração de raios-X, no difratômetro para amostras em pó, marca Philips (Panalytical), sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG. Esta análise foi importantíssima para se determinar a mineralogia das fontes de contaminações de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , quantificadas pelas análises químicas.

#### 4.2.7 – Processamento Mineral

Terminada a fase de caracterização das frações, que tomou grande parte do tempo da pesquisa, iniciou-se uma fase tentativa de modificação nas características indesejáveis encontradas em algumas frações, sempre utilizando métodos tradicionais de processamento mineral (atrito/escrubagem e separação magnética), com o objetivo de procurar eliminar contaminantes de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Dentro da abrangência de uma dissertação de mestrado, procurou-se verificar se a metodologia empregada era efetiva ou não, sem a preocupação, nesta fase, com otimização dos processos utilizados para separação dos contaminantes.

Considerando que as especificações de ferro contido para produção de vidros mais comuns variam de 0,02%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para vidro Oklahoma e Fontainebleau (LUZ e LINS, 2005) até 0,5%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para fibra de vidro (KOGEL *et alii*, 2006) e que as especificações

de alumina contida variam de 0,057%  $Al_2O_3$  para o vidro Loch Aline, a 3,779%  $Al_2O_3$  para vasilhame de vidro Califórnia (LUZ e LINS, 2005), procurou-se reduzir os teores destes de contaminantes do quartzito, inicialmente, sem cominuição.

Decidiu-se então realizar os testes nas amostras mais diferentes entre si, a amostra SJB01 (a mais contaminada) e amostra SJB03 (a menos contaminada). Foi feita uma composição de cada uma das amostras selecionadas no intervalo granulométrico de interesse para a indústria de vidro, a saber, de  $-0,5+0,3mm$  a  $+0,075mm$  (KOGEL *et alii*, 2006; CRUZ, 2011). Cada composição foi montada com participação mássica proporcional de cada uma das frações, de acordo com os resultados obtidos na análise granulométrica.

A rota de processo utilizada foi: atrição/escrubagem, visando remover as contaminações superficiais das partículas de quartzo, seguida por separação magnética para remoção das partículas de minerais de ferro paramagnéticos e ferromagnéticos presentes.

#### 4.2.7.1 – Preparação das composições

Como se optou por realizar os testes de atrição/escrubagem com três diferentes reagentes, foram necessárias quatro amostras a serem testadas, incluindo a do teste em branco.

A concentração da polpa escolhida foi 10% p/p. Como foi usado um béquer de 1L para os testes e 500g de polpa, a massa de cada amostra testada foi 50g. Assim, cada composição deveria ter mais de 200g, em realidade pelo menos 220g, para permitir todos os testes mais as alíquotas para análises químicas. As tabelas IV.2 e IV.3 mostram a formação das composições que foram testadas.

Tabela IV.2 – Amostra SJB01: massas de amostras utilizadas para formação da composição

Fração granulométrica	Massa pesada para a composição (g)
-0,500+0,300mm	37,38
-0,300+0,212mm	34,22
-0,212+0,150mm	30,64
-0,150+0,106mm	42,19
-0,106+0,075mm	75,58
TOTAL	220,00

Tabela IV.3 – Amostra SJB03: massas de amostras utilizadas para formação da composição

Fração granulométrica	Massa pesada para a composição (g)
-0,500+0,300mm	102,48
-0,300+0,212mm	54,56
-0,212+0,150mm	32,42
-0,150+0,106mm	13,45
-0,106+0,075mm	17,09
TOTAL	220,00

#### 4.2.7.2 – Testes de atrição/escrubagem

Para separação da substância de interesse do quartzito, o quartzo, dos minerais de ganga, primeiramente é preciso eliminar o recobrimento de argilominerais. Este recobrimento pareceu similar ao *slimes coating* observado em sistemas minerais nos quais há partículas de tamanho maior em meio a partículas de tamanho muito pequeno. Por esta aparente similaridade, decidiu-se por usar a metodologia aplicada no tratamento de minérios para eliminar *slimes coating*.

Decidiu-se iniciar os estudos de separação entre as partículas de quartzo e as partículas que formam seu recobrimento de argilominerais usando atrição da amostra em meio

aquoso, com auxílio de três dispersantes: hidróxido de sódio, silicato de sódio e ácido cítrico anidro.

Como não foram encontradas referências bibliográficas relativas à deslamagem de quartzito, para seleção das dosagens de reagentes procurou-se utilizar as referências mais similares a este sistema. TOTOU *et alii* (2011) usaram, para dispersão de um sistema de itabiritos, hidróxido de sódio e silicato de sódio. Para estes, a dispersão máxima foi obtida com silicato de sódio a 800g/t, e dosagem de hidróxido de sódio até atingir o pH 9,6, usando uma solução 0,01mol/L. GREEN e COLOMBO (1984) deslamaram taconitos utilizando dosagens que variaram de 500 a 2000g/t de silicato de sódio, com adição de hidróxido de sódio, obtendo bons resultados. Testes de dispersão de alumina com ácido cítrico indicaram a dosagem de 2,4kg/tonelada (HIDBER *et alii*, 1996).

Para fornecer energia cinética para atrição e permitir a atuação dos dispersantes na superfície das partículas de quartzo e dos argilominerais adsorvidos a ela, usou-se um agitador de pás do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN/EEUFMG, marca Fisatrom, modelo 713. Os testes foram conduzidos com agitação em 500RPM, com tempo de agitação igual a 8 minutos, com mais 1 minuto para estabilização após desligado o agitador. A concentração de sólidos na polpa foi 10%p/p.

#### *Preparação da solução de hidróxido de sódio*

O hidróxido de sódio utilizado é produzido pela Cromoline Química Fina Ltda., fornecido em micropérolas, P.A., peso molecular 40,00. A solução utilizada foi de 0,01mol/L, o que demandou 0,4g do reagente, adicionada a um balão volumétrico de 1L de capacidade, diluída com água.

#### *Preparação da solução de ácido cítrico anidro*

O ácido cítrico anidro a ser utilizado é produzido pela Vetec Química Fina Ltda., fornecido como sólido em pó, P.A., de peso molecular 192,12. A solução utilizada foi

de 0,1mol/L, o que demandou 19,212g do reagente, adicionada a um balão volumétrico de 1L de capacidade, diluída com água.

#### *Preparação da solução de silicato de sódio alcalino*

O silicato de sódio alcalino C-112 utilizado é produzido pela Sulfal Química Ltda. A solução utilizada foi de 1%p/v. Como o reagente é líquido, optou-se por pesar 10g do reagente e diluir em 1000mL de água.

#### *Escrubagem em branco*

De cada uma das duas composições, a da amostra SJB01 e a da amostra SJB03, tomou-se 50g. Adicionou-se a um béquer e acrescentou-se água até atingir a massa de polpa de 500g. Agitou-se durante 8 minutos a 500RPM. Deixou-se estabilizar a dispersão por mais 1 minuto depois de cessada a agitação, retirou-se a água em excesso, secou-se em bandeja sobre chapa quente a 120°C até eliminar toda a umidade. As amostras “Amostra 01 – Branco – Escrubagem” e “Amostra 03 – Branco – Escrubagem” foram ensacadas, rotuladas, uma pequena alíquota foi enviada para análise química e o restante da amostra foi reservada para os testes de separação magnética.

#### *Escrubagem com hidróxido de sódio*

De cada uma das duas composições, a da amostra SJB01 e a da amostra SJB03, tomou-se 50g. Adicionou-se a um béquer e acrescentou-se água até atingir a massa de polpa de 500g. Iniciada a agitação, adicionou-se a solução de hidróxido de sódio até atingir o pH 9,6. Agitou-se durante 8 minutos a 500RPM. Deixou-se estabilizar a dispersão por mais 1 minuto depois de cessada a agitação. Retirou-se a água em excesso, secou-se em bandeja sobre chapa quente a 120°C até eliminar toda a umidade. As amostras “Amostra 01 – NaOH – Escrubagem” e “Amostra 03 – NaOH – Escrubagem” foram ensacadas, rotuladas, uma pequena alíquota foi enviada para análise química, e o restante da amostra foi reservada para os testes de separação magnética.

### *Escrubagem com ácido cítrico*

De cada uma das duas composições, a da amostra SJB01 e a da amostra SJB03, tomou-se 50g. Adicionou-se a um béquer e acrescentou-se água até atingir a massa de polpa de 500g. Iniciada a agitação, adicionou-se 6,25mL da solução de ácido cítrico. Agitou-se durante 8 minutos a 500RPM. Deixou-se estabilizar a dispersão por mais 1 minuto depois de cessada a agitação. Retirou-se a água em excesso, secou-se em bandeja sobre chapa quente a 120°C até eliminar toda a umidade. As amostras “Amostra 01 – Cítrico – Escrubagem” e “Amostra 03 – Cítrico – Escrubagem” foram ensacadas, rotuladas, uma pequena alíquota foi enviada para análise química, e o restante da amostra foi reservada para os testes de separação magnética.

### *Escrubagem com silicato de sódio alcalino*

De cada uma das duas composições, a da amostra SJB 01 e a da amostra SJB03, tomou-se 50g. Adicionou-se a um béquer e acrescentou-se água até atingir a massa de polpa de 500g. Iniciada a agitação, adicionou-se 0,04g de silicato de sódio alcalino, igual a 4mL da solução preparada, para a dosagem de 800g/t. Agitou-se durante 8 minutos a 500RPM. Deixou-se estabilizar a dispersão por mais 1 minuto depois de cessada a agitação. Retirou-se a água em excesso, secou-se em bandeja sobre chapa quente a 120°C até eliminar toda a umidade. As amostras “Amostra 01 – Silicato – Escrubagem” e “Amostra 03 – Silicato – Escrubagem” foram ensacadas, rotuladas, uma pequena alíquota foi enviada para análise química, e o restante da amostra foi reservada para os testes de separação magnética.

#### 4.2.7.3 – Testes de separação magnética

Os principais contaminantes de Fe no quartzito são os minerais normalmente encontrados na formação ferrífera vizinha ao quartzito Taboões no Quadrilátero Ferrífero: hematita, magnetita, goethita, etc.

Para a separação magnética, foi selecionado o separador magnético de alta intensidade a úmido (WHIMS) do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN/EEUFMG. Seu modelo é WHIMS 3x4L, e foi fabricado pela Carpco Inc. de Jacksonville, Florida, EUA.

Como a dispersão granulométrica das amostras selecionadas varia de  $<0,5\text{mm}$  a  $>0,075\text{mm}$ , optou-se pela cuba com abertura (*gap*) de 1,0mm. Uma vez que o teste, neste nível de investigação, visa obter a maior redução do teor de Fe no concentrado não magnético, independentemente da seletividade ou da recuperação em massa, optou-se trabalhar com a intensidade máxima de campo para esta cuba neste equipamento: 21kGauss.

Para a cuba utilizada, o volume máximo a ser admitido é de 120mL de polpa. Considerando uma porcentagem de sólidos de 20%p/p, escolhida para se obter uma boa eficiência na remoção de ferro, a massa de cada amostra testada foi de 20g para 100mL de polpa.

Ligou-se o WHIMS na intensidade máxima (7A), o que corresponde a um campo de 21kGauss para a cuba de 1,0mm de abertura.

Passaram-se cada uma das polpas contendo amostra, lavando-se bem com 1L de água, tendo o cuidado de lavar também a rampa de saída do WHIMS. O passante não-magnético foi recolhido em béquer de 4L.

Trocou-se então o béquer por outro de 4L para receber o capturado pelo equipamento, a fração magnética da amostra. Desligou-se então o WHIMS e lavou-se com água o equipamento, recolhendo no béquer toda a parte da amostra atraída pelo campo magnético.

Secaram-se ambas as frações (magnético e não-magnético) das amostras, em bandeja sobre chapa quente a 120°C até eliminar toda a umidade e enviou-se a fração não-

magnética para análise química. A fração magnética de todas as amostras teve massa insuficiente para análise química.

## 5 – Resultados e discussão

### 5.1 – Caracterização

#### 5.1.1 – Análises químicas (amostras coletadas)

Os resultados globais de análises químicas quatro amostras selecionadas para este projeto, denominadas SJB01 a SJB04 (amostras de cabeça), se encontram na tabela V.1.

Tabela V.1 – Análises globais (cabeça) das quatro amostras selecionadas para o projeto

AMOSTRA	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
SJB01	83,5	6,28	5,47	0,02	0,46	0,38	0,024	<0,1	1,7	0,04	1,79
SJB02	95,3	1,21	1,52	0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,3	0,02	0,27
SJB03	97,9	0,43	1,09	0,01	<0,1	0,03	<0,01	<0,1	0,07	0,01	0,09
SJB04	97,7	0,54	1,71	0,02	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,06	0,04	0,18

Estas análises representam, em termos químicos, o que se esperava encontrar em campo: na medida em que se caminha para leste na jazida, na frente exposta atualmente, vai-se afastando gradativamente do contato do quartzito com o filito, adentrando-se cada vez mais na formação Taboões e no cerne do quartzito, com uma tendência geral de aumento dos teores de SiO<sub>2</sub> e diminuição dos teores dos contaminantes.

#### 5.1.2 – Análises granuloquímicas

Para as quatro amostras representativas consideradas neste projeto, tem-se os seguintes resultados para as análises granuloquímicas, tabelas V.2 a V.5.

Tabela V.2 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB01

Peneiras		Amostra SJB01												
		Retido		Teores										
#Tyler	mm	%	%Acum. Acima	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
6	3,350	11,16	11,16	91,50	2,55	4,55	0,04	0,19	0,23	0,013	<0,1	0,87	0,02	0,87
12	1,700	2,23	13,39	85,30	4,27	6,35	0,05	0,38	0,43	0,038	<0,1	1,39	0,05	1,43
20	0,850	1,19	14,58	88,20	3,43	4,71	0,05	0,27	0,31	0,020	<0,1	1,13	0,05	1,09
24	0,710	0,55	15,13	91,10	2,15	3,09	0,03	0,17	0,17	<0,01	<0,1	0,70	0,04	0,58
35	0,500	1,51	16,64	94,50	1,29	1,63	0,01	<0,1	0,10	<0,01	<0,1	0,41	<0,01	0,41
50	0,300	4,27	20,91	98,30	1,04	1,30	0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,33	<0,01	0,51
70	0,212	3,91	24,82	97,20	1,19	1,49	0,01	<0,1	0,09	<0,01	<0,1	0,38	0,01	0,43
100	0,150	3,50	28,32	95,40	1,21	1,31	0,01	<0,1	0,09	<0,01	<0,1	0,40	<0,01	0,43
140	0,106	4,82	33,14	95,20	1,27	1,23	<0,01	<0,1	0,09	<0,01	<0,1	0,43	<0,01	0,49
200	0,075	8,63	41,77	95,20	1,08	1,08	<0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,35	<0,01	0,30
270	0,053	6,37	48,15	98,00	0,88	1,22	0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,29	<0,01	0,22
325	0,045	6,91	55,05	98,50	0,64	1,12	<0,01	<0,1	0,06	<0,01	<0,1	0,21	<0,01	0,21
400	0,038	5,49	60,55	96,30	0,80	1,84	0,01	<0,1	0,10	<0,01	<0,1	0,26	<0,01	0,30
FUNDO	-	39,45	100,00	69,80	12,50	7,04	0,03	0,85	0,72	0,056	<0,1	3,46	0,02	4,16
Total:		100,00	-	85,11	5,82	4,09	0,02	0,41	0,36	0,03	<0,1	1,66	0,02	1,94

Tabela V.3 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB02

Peneiras		Amostra SJB02												
		Retido		Teores										
#Tyler	mm	%	%Acum. Acima	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
6	3,350	13,96	13,96	95,20	2,26	1,34	<0,01	0,16	0,22	<0,01	<0,1	0,75	0,05	0,57
12	1,700	0,67	14,63	94,00	2,16	1,96	0,01	0,15	0,19	<0,01	<0,1	0,66	0,15	0,40
20	0,850	1,91	16,54	97,60	0,58	0,53	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	<0,1	0,17	<0,01	0,20
24	0,710	1,00	17,55	97,60	0,35	0,82	0,02	<0,1	0,03	<0,01	<0,1	0,09	<0,01	0,00
35	0,500	8,97	26,51	98,90	0,21	0,66	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	<0,01	0,10
50	0,300	18,28	44,79	99,90	0,18	0,35	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,02
70	0,212	10,20	54,99	98,10	0,17	0,22	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,05
100	0,150	5,14	60,13	98,90	0,28	0,33	<0,01	<0,1	0,01	<0,01	<0,1	0,07	<0,01	0,05
140	0,106	3,06	63,20	98,50	0,32	0,31	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,10	<0,01	0,11
200	0,075	5,37	68,56	97,60	0,35	0,45	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,11	<0,01	0,11
270	0,053	9,38	77,94	97,90	0,34	0,28	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,11	<0,01	0,06
325	0,045	3,91	81,85	99,60	0,32	0,38	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,11	<0,01	0,13
400	0,038	3,24	85,09	99,80	0,42	0,34	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,14	<0,01	0,10
FUNDO	-	14,91	100,00	88,20	4,99	2,79	0,02	0,30	0,19	0,036	<0,1	1,22	0,04	1,83
Total:		100,00	-	96,70	1,26	0,87	<0,01	<0,1	0,07	<0,01	<0,1	0,35	<0,01	0,40

Tabela V.4 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB03

Peneiras		Amostra SJB03												
		Retido		Teores										
#Tyler	mm	%	%Acumul. Acima	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
6	3,350	30,51	30,51	98,40	0,30	0,90	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,08	<0,01	0,08
12	1,700	0,71	31,23	99,40	0,31	0,27	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	<0,1	0,05	0,01	0,19
20	0,850	2,02	33,25	98,90	0,28	0,20	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	<0,01	0,15
24	0,710	1,10	34,35	99,50	0,26	0,11	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,09
35	0,500	11,60	45,95	99,10	0,26	0,11	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,10
50	0,300	17,04	63,00	99,20	0,25	0,10	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	<0,01	0,14
70	0,212	9,07	72,07	99,50	0,19	0,09	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	0,12
100	0,150	5,39	77,46	99,30	0,14	0,13	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	<0,01	0,19
140	0,106	2,24	79,70	99,90	0,14	0,13	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	<0,01	0,42
200	0,075	2,84	82,54	99,70	0,16	0,17	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	<0,01	0,16
270	0,053	4,09	86,62	99,40	0,24	0,19	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	<0,01	0,15
325	0,045	1,65	88,27	99,10	0,23	0,42	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,07	<0,01	0,24
400	0,038	2,19	90,46	99,10	0,29	0,30	0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,09	<0,01	0,22
FUNDO	-	9,54	100,00	94,90	2,01	1,18	0,01	<0,1	0,08	0,013	<0,1	0,36	<0,01	1,26
Total:		100,00	-	98,60	0,42	0,47	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	<0,1	0,09	<0,01	0,24

Tabela V.5 – Resultados de análises granuloquímicas: amostra SJB04

Peneiras		Amostra SJB04												
		Retido		Teores										
#Tyler	mm	%	%Acumul. Acima	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%MnO	%PPC
6	3,350	40,22	40,22	99,00	0,29	0,77	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	0,02	0,07
12	1,700	0,53	40,75	97,90	0,62	0,87	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,17	0,03	0,31
20	0,850	1,44	42,19	99,10	0,35	0,45	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,07	0,03	0,25
24	0,710	1,07	43,26	99,10	0,22	0,25	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	0,10
35	0,500	12,36	55,62	99,80	0,20	0,16	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	0,12
50	0,300	13,69	69,32	99,20	0,23	0,13	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	<0,01	0,11
70	0,212	6,84	76,16	99,10	0,17	0,17	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	<0,01	0,06
100	0,150	3,87	80,03	99,10	0,15	0,19	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,01	0,15
140	0,106	2,21	82,24	99,60	0,16	0,25	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,02	0,22
200	0,075	2,47	84,71	99,70	0,17	0,33	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,03	0,19
270	0,053	2,51	87,22	99,60	0,23	0,45	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,05	0,03	0,26
325	0,045	2,13	89,35	98,70	0,25	0,44	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	0,02	0,23
400	0,038	2,23	91,58	99,10	0,28	0,45	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	0,02	0,27
FUNDO	-	8,42	100,00	93,70	1,98	2,11	0,02	<0,1	0,07	0,033	<0,1	0,28	0,09	1,80
Total:		100,00	-	98,73	0,39	0,60	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,07	0,02	0,25

Em termos de granulometria, quando se caminha de oeste para leste, da amostra SJB01 para amostra SJB04, vê-se um engrossamento ou diminuição de finos e da dispersão granulométrica do quartzito. Notadamente, o analito  $Al_2O_3$ , que se encontra normalmente relacionado aos argilominerais, diminui seu teor na medida em que a amostra se torna mais grosseira e vai-se afastando do contato com o filito e entrando mais no cerne do quartzito Taboões. A tabela V.6 mostra esta mudança em termos do  $D_{50}$ , e o gráfico V.1 mostra esta mudança gradual em termos de % retida acumulada acima no peneiramento.

Tabela V.6 – Mudança do  $D_{50}$  das amostras denotando engrossamento do quartzito

Amostra	$D_{50}$ (mm)
SJB01	0,051
SJB02	0,260
SJB03	0,462
SJB04	0,596

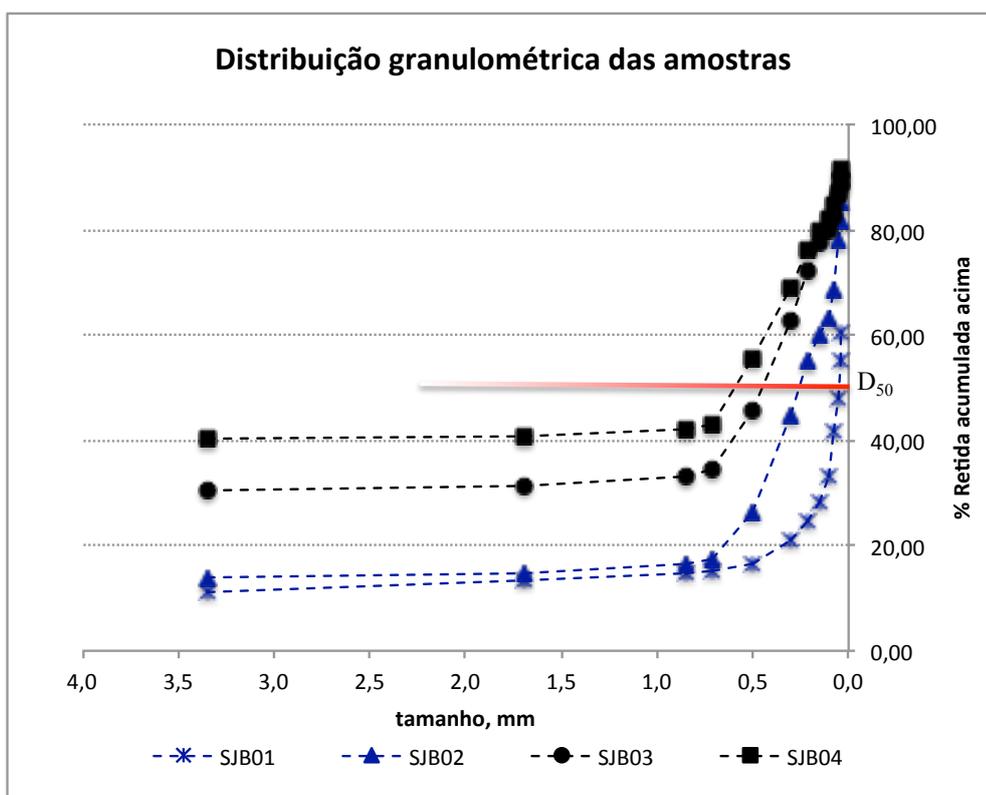


Gráfico V.1 – Distribuição granulométrica das amostras em estudo.

Também é notável, nas tabelas V.2 a V.5, uma maior concentração dos contaminantes  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nas frações mais grosseiras e também nas frações mais finas das amostras (aqui incluindo o material  $<0,038\text{mm}$ , o fundo da peneira).

A presença dos contaminantes  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é associada à presença, já esperada, de minerais de ferro e argilominerais em meio ao quartzito. O que as tabelas V.2 a V.5 trazem de novidade é a presença destes em todas as faixas granulométricas analisadas para estas amostras. A consequência direta deste fato é que este quartzito não está naturalmente pronto para atender completamente a nenhuma especificação para areias industriais supracitadas. São imprescindíveis ajustes via tratamento de minérios para ser enquadrado nas faixas especificadas para os diversos produtos. Em termos de ajustes nos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , o quartzito argiloso necessita de maior redução destes contaminantes que o quartzito, para produzir concentrados dentro das especificações.

#### *Índice de finura*

Os resultados da análise granulométrica alimentaram as tabelas utilizadas para cálculo do índice de finura, adaptada de RUBIO e NOGUEIRA (2000).

A série de peneiras utilizada para a análise granulométrica neste projeto inclui umas e exclui outras da série estabelecida por RUBIO e NOGUEIRA (2000) para areia utilizada em fundição, pois este trabalho abrangeu não só a perspectiva de utilização do quartzito como areia industrial para fundições. Desta forma, tornou-se necessário usar um artifício matemático para interpolar os valores que seriam obtidos com inclusão das peneiras 30 (0,600mm) e 40 (0,425mm) da ABNT.

Na prática, adotou-se regressão linear, utilizando a correlação quase perfeita entre a abertura das peneiras, em milímetros, e a porcentagem retida acumulada acima, num intervalo abrangendo duas peneiras ABNT acima da peneira 30 (0,600mm), peneiras 20 (0,850mm) e 24 (0,710mm), e duas peneiras abaixo da peneira 40 (0,425mm), peneiras 50 (0,300mm) e 70 (0,212mm).

A regressão linear para a amostra SJB01, considerando o intervalo entre as peneiras 20 (0,850mm) e 70 (0,212mm) da ABNT, retornou um coeficiente de explicação ( $R^2$ ) igual a 0,98907. Ou seja, a equação a seguir explica 98,907% dos resultados neste intervalo para a amostra SJB01.

$$\% \text{ retida acumulada acima} = 33,475 * (\text{abertura peneira, mm})^2 - 50,501 * (\text{abertura peneira}) + 33,605$$

Equação V.1 – Correlação entre a abertura da peneira, em mm, e a porcentagem retida acumulada acima para o intervalo abrangendo as peneiras 20 (0,850mm) a 70 (0,212mm) da ABNT para a amostra SJB 01.

Calculando os valores para porcentagem retida acumulada acima para as peneiras 30 (0,600mm) e 40 (0,425mm), chega-se então aos valores de porcentagem retida simples e massa retida nas peneiras. Os resultados, incluindo estes valores calculados se encontram na tabela V.7.

Tabela V.7 – Granulometria da amostra SJB01, incluindo os valores CALCULADOS para as peneiras 30 e 40 da série da ABNT

Peneira ABNT	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Ac. Acima
6	3,350	711	11,16	11,16
12	1,700	142	2,23	13,39
20	0,850	76	1,19	14,58
24	0,710	35	0,55	15,13
30 (calculada)	0,600	14	0,22	15,36
35	0,500	82	1,29	16,64
40 (calculada)	0,425	99	1,55	18,19
50	0,300	209	3,28	21,47
70	0,212	214	3,35	24,82
100	0,150	223	3,50	28,32
140	0,106	307	4,82	33,14
200	0,075	550	8,63	41,77
270	0,053	406	6,37	48,15
325	0,045	440	6,91	55,05
400	0,038	350	5,49	60,55
Fundo	-	2513	39,45	100,00

Tomando por base a tabela V.7, puderam-se inserir os valores na tabela para cálculo do índice de finura para a amostra SJB01, demonstrado na tabela V.8.

Tabela V.8 – Cálculo do índice de finura para a amostra SJB01

Peneira ABNT	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retida	Fator	% x Fator
6	3,350	711	11,16	3	33,5
12	1,700	142	2,23	5	11,1
20	0,850	76	1,19	10	11,9
30 (calculada)	0,600	49	0,77	20	15,4
40 (calculada)	0,425	180	2,83	30	85,0
50	0,300	209	3,28	40	131,2
70	0,212	214	3,35	50	167,6
100	0,150	223	3,50	70	245,1
140	0,106	307	4,82	100	481,9
200	0,075	550	8,63	140	1208,8
270	0,053	406	6,37	200	1274,7
Fundo	-	3303	51,85	300	15555,7
Total	-	6370	100	-	-
				Índice Finura	192

Como era de se esperar, esta amostra apresenta um índice de finura muito elevado, já que é realmente a mais fina das quatro amostras, por estar mais próxima do contato com o filito. Se já não houvesse outras restrições em termos de adequação química (ABNT – NBR 12672), ainda assim seria muito fina para ser considerada um produto aproveitável diretamente pela indústria de fundição. Há de ser adequada em termos de granulometria e química.

De forma análoga, no caso da amostra SJB02, considerando o intervalo entre as peneiras 20 (0,850mm) e 70 (0,212mm) da ABNT, a regressão linear retornou um coeficiente de explicação ( $R^2$ ) igual a 0,99987. Ou seja, a equação a seguir explica 99,987% dos resultados neste intervalo para a amostra SJB02.

$$\% \text{ retida acumulada acima} = 109,18 * (\text{abertura peneira, mm})^2 - 176,38 * (\text{abertura peneira}) + 87,616$$

Equação V.2 – Correlação entre a abertura da peneira, em mm, e a porcentagem retida acumulada acima para o intervalo abrangendo as peneiras 20 (0,850mm) a 70 (0,212mm) da ABNT para a amostra SJB02.

Calculando os valores para porcentagem retida acumulada acima para as peneiras 30 (0,600mm) e 40 (0,425mm), chega-se então aos valores de porcentagem retida simples e massa retida nas peneiras. Os resultados, incluindo estes valores calculados, se encontram na tabela V.9.

Tabela V.9 – Granulometria da amostra SJB02, incluindo os valores CALCULADOS para as peneiras 30 e 40 da série da ABNT

Peneira ABNT	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Ac. Acima
6	3,350	1043	13,96	13,96
12	1,700	50	0,67	14,63
20	0,850	143	1,91	16,54
24	0,710	75	1,00	17,55
30 (calculada)	0,600	265	3,55	21,09
35	0,500	421	5,63	26,72
40 (calculada)	0,425	422	5,65	32,38
50	0,300	908	12,15	44,53
70	0,212	782	10,46	54,99
100	0,150	384	5,14	60,13
140	0,106	229	3,06	63,20
200	0,075	401	5,37	68,56
270	0,053	701	9,38	77,94
325	0,045	292	3,91	81,85
400	0,038	242	3,24	85,09
Fundo	-	1114	14,91	100,00

Tomando por base a tabela V.9, puderam-se inserir os valores na tabela para cálculo do índice de finura para a amostra SJB02, demonstrado na tabela V.10.

Tabela V.10 – Cálculo do índice de finura para a amostra SJB02

Peneira ABNT	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retida	Fator	% x Fator
6	3,350	1043	13,96	3	41,9
12	1,700	50	0,67	5	3,3
20	0,850	143	1,91	10	19,1
30 (calculada)	0,600	340	4,55	20	91,0
40 (calculada)	0,425	843	11,28	30	338,5
50	0,300	908	12,15	40	486,1
70	0,212	782	10,46	50	523,2
100	0,150	384	5,14	70	359,7
140	0,106	229	3,06	100	306,5
200	0,075	401	5,37	140	751,3
270	0,053	701	9,38	200	1876,3
Fundo	-	1648	22,06	300	6616,7
Total	-	7472	100	-	-
				Índice Finura	114

Esta amostra é mais grosseira que a amostra SJB01, o que refletiu em seu índice de finura. Também se encontra fora da faixa recomendada pela ABNT – NBR 12672, mas se aproxima mais desta em termos de especificação química. Também aqui cabem adequações granulométricas e químicas.

Para a amostra SJB03, considerando o intervalo entre as peneiras 20 (0,850mm) e 70 (0,212mm) da ABNT, tem-se a seguinte equação que explica 99,987% dos resultados neste intervalo.

$$\% \text{ retida acumulada acima} = 89,596 * (\text{abertura peneira, mm})^2 - 157,28 * (\text{abertura peneira}) + 101,75$$

Equação V.3 – Correlação entre a abertura da peneira, em mm, e a porcentagem retida acumulada acima para o intervalo abrangendo as peneiras 20 (0,850mm) a 70 (0,212mm) da ABNT para a amostra SJB03.

Calculando os valores para porcentagem retida acumulada acima para as peneiras 30 (0,600mm) e 40 (0,425mm), chega-se então aos valores de porcentagem retida simples e massa retida nas peneiras. O resultado, incluindo estes valores calculados, se encontra na tabela V.11.

Tabela V.11 – Granulometria da amostra SJB03, incluindo os valores CALCULADOS para as peneiras 30 e 40 da série da ABNT

Peneira ABNT	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Ac. Acima
6	3,350	1964	30,51	30,51
12	1,700	46	0,71	31,23
20	0,850	130	2,02	33,25
24	0,710	71	1,10	34,35
30 (calculada)	0,600	340	5,29	39,64
35	0,500	407	6,32	45,95
40 (calculada)	0,425	331	5,14	51,09
50	0,300	743	11,54	62,63
70	0,212	608	9,44	72,07
100	0,150	347	5,39	77,46
140	0,106	144	2,24	79,70
200	0,075	183	2,84	82,54
270	0,053	263	4,09	86,62
325	0,045	106	1,65	88,27
400	0,038	141	2,19	90,46
Fundo	-	614	9,54	100,00

Tomando por base a tabela V.11, puderam-se inserir os valores na tabela para cálculo do índice de finura para a amostra SJB03, demonstrado na tabela V.12.

Tabela V.12 – Cálculo do índice de finura para a amostra SJB03

Peneira ABNT	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retida	Fator	% x Fator
6	3,350	1964	30,51	3	91,5
12	1,700	46	0,71	5	3,6
20	0,850	130	2,02	10	20,2
30 (calculada)	0,600	411	6,39	20	127,8
40 (calculada)	0,425	737	11,45	30	343,6
50	0,300	743	11,54	40	461,6
70	0,212	608	9,44	50	471,9
100	0,150	347	5,39	70	377,3
140	0,106	144	2,24	100	223,7
200	0,075	183	2,84	140	398,0
270	0,053	263	4,09	200	817,2
Fundo	-	861	13,38	300	4012,7
Total	-	6437	100	-	-
				Índice Finura	73

Esta amostra é mais grosseira até agora, o que refletiu em seu índice de finura, quase atingindo a faixa recomendada pela ABNT – NBR 12672, ainda estando fora das especificações químicas. Também aqui cabem adequações granulométricas e químicas.

Finalmente, para a amostra SJB04, considerando o intervalo entre as peneiras 20 (0,850mm) e 70 (0,212mm) da ABNT, tem-se a seguinte equação que explica 99,484% dos resultados neste intervalo.

$$\% \text{ retida acumulada acima} = 60,231 * (\text{abertura peneira, mm})^2 - 119,29 * (\text{abertura peneira}) + 99,259$$

Equação V.4 – Correlação entre a abertura da peneira, em mm, e a porcentagem retida acumulada acima para o intervalo abrangendo as peneiras 20 (0,850mm) a 70 (0,212mm) da ABNT para a amostra SJB04.

Calculando os valores para porcentagem retida acumulada acima para as peneiras 30 (0,600mm) e 40 (0,425mm), chega-se então aos valores de porcentagem retida simples e massa retida nas peneiras. O resultado, incluindo estes valores calculados, se encontra na tabela V.13.

Tabela V.13 – Granulometria da amostra SJB04, incluindo os valores CALCULADOS para as peneiras 30 e 40 da série da ABNT

Peneira ABNT	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Ac. Acima
6	3,350	2869	40,22	40,22
12	1,700	38	0,53	40,75
20	0,850	103	1,44	42,19
24	0,710	76	1,07	43,26
30 (calculada)	0,600	436	6,11	49,37
35	0,500	378	5,30	54,67
40 (calculada)	0,425	340	4,77	59,44
50	0,300	674	9,45	68,89
70	0,212	518	7,26	76,16
100	0,150	276	3,87	80,03
140	0,106	158	2,21	82,24
200	0,075	176	2,47	84,71
270	0,053	179	2,51	87,22
325	0,045	152	2,13	89,35
400	0,038	159	2,23	91,58
Fundo	-	601	8,42	100,00

Tomando por base a tabela V.13, puderam-se inserir os valores na tabela para cálculo do índice de finura para a amostra SJB04, demonstrado na tabela V.14.

Tabela V.14 – Cálculo do índice de finura para a amostra SJB04

Peneira ABNT	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retida	Fator	% x Fator
6	3,350	2869	40,22	3	120,6
12	1,700	38	0,53	5	2,7
20	0,850	103	1,44	10	14,4
30 (calculada)	0,600	512	7,18	20	143,5
40 (calculada)	0,425	719	10,07	30	302,2
50	0,300	674	9,45	40	378,1
70	0,212	518	7,26	50	363,2
100	0,150	276	3,87	70	270,8
140	0,106	158	2,21	100	221,5
200	0,075	176	2,47	140	345,4
270	0,053	179	2,51	200	501,8
Fundo	-	912	12,78	300	3835,2
Total	-	7134	100	-	-
Índice Finura					65

Esta amostra é mais grosseira das quatro em estudo, o que refletiu em seu índice de finura, ainda mais próximo à faixa recomendada pela ABNT – NBR 12672, mas fora em termos de especificações químicas, precisando de menores ajustes para se tornar produto tecnicamente viável.

### 5.1.3 – Descrição de amostras sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X

O exame das frações granulométricas das quatro amostras consideradas neste projeto sob lupa binocular gerou 96 fotografias, com suas respectivas descrições. As tabelas V.15 a V.18 resumem as descrições das amostras visualizadas sob lupa binocular e os resultados da difração de raios-X das faixas granulométricas selecionadas das amostras em estudo.

Tabela V.15 – Amostra SJB01: Frações granulométricas, descrição da visualização sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X

Peneiras			Amostra SJB01	
#Tyler	mm	% Retida acumul. acima	Visualização sob LUPA (descrição)	Difração de raios-X (minerais/fases presentes)
6	3,350	11,16		
12	1,700	13,39	Grãos e grânulos angulosos de quartzo leitoso, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3-0,5, alguns com cobertura ocre de argilominerais e minerais de ferro, alguns com incrustações de minerais de ferro, pouco quartzo hialino, xenogrãos liberados de itabirito, grãos de minerais de ferro (hematita e goethita).	quartzo (abundante); moscovita (baixo); hematita (baixo); goethita (traço)
20	0,850	14,58	Grãos e grânulos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de argilominerais e minerais de ferro, alguns com incrustações de minerais de ferro, pouco quartzo hialino, xenogrãos liberados de itabirito, grãos de minerais de ferro (hematita e goethita).	quartzo (abundante); moscovita (baixo); hematita (baixo); goethita (traço)
24	0,710	15,13	Grãos e grânulos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de argilominerais e minerais de ferro, alguns com incrustações de minerais de ferro, pouco quartzo hialino, xenogrãos liberados de itabirito, grãos de minerais de ferro (hematita e goethita).	
35	0,500	16,64	Grãos e grânulos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de argilominerais e minerais de ferro, alguns com incrustações de minerais de ferro, pouco quartzo hialino, xenogrãos liberados de itabirito, grãos de minerais de ferro (hematita e goethita).	
50	0,300	20,91		
70	0,212	24,82	Grânulos e grãos de quartzo leitoso e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, algumas com cobertura ocre de argilominerais e minerais de ferro, raras partículas liberadas de minerais de ferro, presença de incrustações em quartzo.	
100	0,150	28,32	Grãos e grânulos de quartzo leitoso e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, sem incrustações visíveis, grãos, algumas com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, partículas de minerais de ferro liberadas.	quartzo (abundante); moscovita (baixo-traço); hematita (baixo-traço); goethita (traço)
140	0,106	33,14	Grãos e grânulos de quartzo leitoso e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, poucas partículas liberadas de minerais de ferro, raras incrustações de minerais de ferro.	
200	0,075	41,77	Grãos de quartzo leitoso e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, poucas partículas liberadas de minerais de ferro, não visíveis incrustações de minerais de ferro.	
270	0,053	48,15	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, algumas partículas liberadas de minerais de ferro, não visíveis incrustações de minerais de ferro.	
325	0,045	55,05	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, algumas partículas liberadas de minerais de ferro, não visíveis incrustações de minerais de ferro.	
400	0,038	60,55	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, algumas partículas liberadas de minerais de ferro, não visíveis incrustações de minerais de ferro.	quartzo (abundante); moscovita (baixo); hematita (traço); goethita (traço)
FUNDO	<0,038	100,00	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, muitas partículas com película de minerais de ferro e lama vinda das demais frações, muitas partículas liberadas de minerais de ferro.	Quartzo (abundante); moscovita (médio); caulinita (médio-baixo); hematita (médio-baixo), goethita (baixo).

Tabela V.16 – Amostra SJB02: Frações granulométricas, descrição da visualização sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X

Peneiras			Amostra SJB02	
#Tyler	mm	% Retida acumul. acima	Visualização sob LUPA (descrição)	Difração de raios-X (minerais/fases presentes)
6	3,350	13,96		
12	1,700	14,63	Grãos e grânulos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, alguns com incrustações de minerais de ferro, ausente quartzo hialino, raros xenogrãos liberados, sem grãos de minerais de ferro.	quartzo (abundante); moscovita (baixo); caulinita (baixo); hematita (baixo); goethita (traço)
20	0,850	16,54	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,9, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raríssimos com incrustações de minerais de ferro.	quartzo (abundante).
24	0,710	17,55	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de argilominerais e minerais de ferro, poucos com incrustações de minerais de ferro, pouco quartzo hialino.	
35	0,500	26,51	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, poucos hialinos, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns grânulos com ocre (argilominerais e minerais de ferro), raros com incrustações de minerais de ferro.	
50	0,300	44,79		
70	0,212	54,99	Grânulos e grãos de quartzo leitoso e hialino, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas liberadas da minerais de ferro, presença de incrustações de minerais de ferro em quartzo.	
100	0,150	60,13	Grãos de quartzo leitoso (maioria) e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, raras incrustações visíveis, poucas com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas de minerais de ferro liberadas.	quartzo (abundante)
140	0,106	63,20	Grãos de quartzo leitoso (maioria) e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas liberadas de minerais de ferro, raras com incrustações de minerais de ferro.	
200	0,075	68,56	Grãos de quartzo leitoso (maioria) e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas liberadas de minerais de ferro, não visíveis incrustações de minerais de ferro.	
270	0,053	77,94	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, algumas partículas liberadas de minerais de ferro, não visíveis incrustações de minerais de ferro.	
325	0,045	81,85	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, algumas partículas liberadas de minerais de ferro, não visíveis incrustações de minerais de ferro.	
400	0,038	85,09	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, raras destas partículas com película de minerais de ferro e argilominerais, algumas partículas liberadas de minerais de ferro, não visíveis incrustações de minerais de ferro.	quartzo (abundante).
PAN	<0,038	100,00	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, muitas partículas com película de minerais de ferro e lama vinda das demais frações, muitas partículas liberadas de minerais de ferro.	quartzo (abundante); moscovita (baixo); caulinita (baixo); hematita (baixo); goethita (traço)

Tabela V.17 – Amostra SJB03: Frações granulométricas, descrição da visualização sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X

Peneiras			Amostra SJB03	
#Tyler	mm	% Retida acumul. acima	Visualização sob LUPA (descrição)	Difração de raios-X (minerais/fases presentes)
6	3,350	30,51		
12	1,700	31,23	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, alguns com incrustações de minerais de ferro, ausente quartzo hialino, sem xenogrãos liberados, sem grãos de minerais de ferro.	
20	0,850	33,25	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raríssimos com incrustações de minerais de ferro.	
24	0,710	34,35	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de argilominerais e minerais de ferro, poucos com incrustações de minerais de ferro, sem xenogrãos, partículas mistas ou minerais de ferro isolados.	
35	0,500	45,95	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, poucos com incrustações de minerais de ferro, sem xenogrãos, partículas mistas ou minerais de ferro isolados.	
50	0,300	63,00		
70	0,212	72,07	Grânulos e grãos de quartzo leitoso (maioria) e hialino, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, sem incrustações visíveis, poucas com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais.	
100	0,150	77,46	Grânulos e grãos de quartzo leitoso (maioria) e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, sem incrustações visíveis, poucas com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais.	
140	0,106	79,70	Grãos de quartzo leitoso e hialino em igual proporção, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, sem incrustações visíveis, poucos com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas de minerais de ferro liberadas.	
200	0,075	82,54	Grãos de quartzo leitoso e hialino em igual proporção, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, sem incrustações visíveis, poucos com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas de minerais de ferro liberadas.	
270	0,053	86,62	Grãos de quartzo hialino em sua maioria, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, presença de quartzo leitoso, grãos subarredondados, irregulares, sacaróides, pouca presença de partículas amareladas, raras partículas de possíveis minerais de ferro.	
325	0,045	88,27	Grãos de quartzo hialino em sua maioria, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, algum quartzo leitoso, grãos subarredondados, irregulares, sacaróides, pouca presença de partículas amareladas, raras partículas de minerais de ferro liberadas.	quartzo (abundante).
400	0,038	90,46	Grãos de quartzo hialino em sua maioria, algum quartzo leitoso, grãos subarredondados, irregulares, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, pouca presença de partículas amareladas, raras partículas de minerais de ferro liberadas.	quartzo (abundante).
PAN	<0,038	100,00	Grãos de quartzo hialino, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, muitas partículas com película de minerais de ferro e lama vinda das demais frações, algumas partículas liberadas de minerais de ferro.	quartzo (abundante); moscovita (baixo); caulinita (traço).

Tabela V.18 – Amostra SJB04: Frações granulométricas, descrição da visualização sob lupa binocular e resultados da difração de raios-X

Peneiras			Amostra SJB04	
#Tyler	mm	% Retida acumul. acima	Visualização sob LUPA (descrição)	Difração de raios-X (minerais/fases presentes)
6	3,350	40,22		
12	1,700	40,75	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura amarelada de minerais de ferro e argilominerais, alguns com incrustações de minerais de ferro, ausente quartzo hialino, sem xenogrãos liberados, raros grãos de minerais de ferro.	quartzo (abundante).
20	0,850	42,19	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, alguns com cobertura amarelada de minerais de ferro e argilominerais, alguns com incrustações de minerais de ferro, ausente quartzo hialino, sem xenogrãos liberados, raros grãos de minerais de ferro.	quartzo (abundante).
24	0,710	43,26	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de argilominerais e minerais de ferro, poucos com incrustações de minerais de ferro, sem xenogrãos, partículas mistas ou minerais de ferro isolados.	
35	0,500	55,62	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, poucos com incrustações de minerais de ferro, sem partículas mistas, raros minerais de ferro isolados.	
50	0,300	69,32	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, alguns com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, poucos com incrustações de minerais de ferro, sem partículas mistas, raros minerais de ferro isolados.	
70	0,212	76,16	Grânulos e grãos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, raros hialinos, alguns com incrustações de minerais de ferro, poucas com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas de minerais de ferro liberadas.	
100	0,150	80,03	Grãos e grânulos de quartzo leitoso, angulosos, esfericidade 0,5-0,7, arredondamento 0,3, raros hialinos, alguns com incrustações de minerais de ferro, poucas com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas de minerais de ferro liberadas.	
140	0,106	82,24	Grãos de quartzo leitoso e hialino, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, não visíveis incrustações de minerais de ferro, poucas com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, raras partículas de minerais de ferro liberadas.	
200	0,075	84,71	Grãos de quartzo leitoso e hialino em igual proporção, angulosos, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,3, sem incrustações visíveis, poucas com cobertura ocre de minerais de ferro e argilominerais, não visualizadas partículas de minerais de ferro liberadas.	
270	0,053	87,22	Grãos de quartzo hialino em sua maioria, presença de quartzo leitoso, subarredondados, irregulares, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, pouquíssima presença de partículas amareladas, algumas partículas de possíveis minerais de ferro visíveis liberadas, negras e ocres	
325	0,045	89,35	Grãos de quartzo hialino em sua maioria, presença de quartzo leitoso, grãos subarredondados, irregulares, sacaróides, esfericidade 0,7-0,9, arredondamento 0,5, pouquíssima presença de partículas amareladas, algumas partículas de possíveis minerais de ferro visíveis liberadas, negras e ocres	
400	0,038	91,58	Grãos de quartzo hialino em sua maioria, presença de quartzo leitoso, grãos subarredondados, irregulares, sacaróides, pouquíssima presença de partículas amareladas, poucas partículas de possíveis minerais de ferro visíveis liberadas.	quartzo (abundante); moscovita (baixo); caulinita (traço); hematita (traço); goethita (traços)
PAN	<0,038	100,00		quartzo (abundante); moscovita (baixo); caulinita (baixo); hematita (baixo); goethita (traços)

Em suma, além do óbvio quartzo, foram identificadas as presenças de:

- Minerais de ferro (hematita e goethita), já esperados num quartzito próximo à formação ferrífera (LADEIRA, 1984). Foram identificados tanto na forma de grãos liberados quanto em incrustações na superfície do quartzo e em raras partículas mistas com quartzo.
- Argilominerais, resultantes do profundo intemperismo químico a que foi submetido o quartzito, que o tornou friável. A presença de moscovita é explicada por ser a mica com a menor cinética de dissolução em ambiente submetido ao intemperismo químico (MARTINS *et alii*, 2004). Já a caulinita é oriunda do intemperismo das micas, de modo similar ao descrito por ALENCAR (2002).
- Partículas estranhas ao quartzito, aqui denominas genericamente xenopartículas, incorporadas a ele por ação sequencial de basculamento associado ao metamorfismo, e seguida por processos erosivos (conforme descrito por UHLEIN e OLIVEIRA, 2000).

Quanto à aparência das partículas de quartzo, verificou-se que se apresentam como grãos e grânulos de quartzo até a fração  $>0,212\text{mm}$  (exceto pela amostra SBJ04, onde ainda foram encontrados grânulos na fração  $>0,150\text{mm}$ ) e, abaixo destas, o quartzo se apresenta sob a forma de grãos. Os grãos e grânulos são angulosos até  $>0,075\text{mm}$  e, abaixo desta granulometria, passam a textura sacaroide. O grau de esfericidade das partículas de quartzo, pelo gráfico de estimativa visual de KRUMBEIN e SLOSS (1963), varia de 0,5 a 0,9, mas o arredondamento varia de 0,3 a 0,5, estando assim, abaixo do arredondamento mínimo recomendado pela API para areia propante.

#### 5.1.4 – Descrição de amostras sob MEV-EDS

Para completar a descrição das contaminações no quartzito, foram examinadas no MEV-EDS duas frações da amostra SJB01:  $>0,85\text{mm}$  e  $<0,038\text{mm}$ . Um total de 23 imagens foram obtidas, e algumas destas são mostradas a seguir. Todas as fotos registradas foram obtidas com imagem de elétrons retroespalhados (IER).

Os objetivos foram confirmar, via análise com EDS, as descrições feitas com base na experiência do autor com minerais de ferro, nas análises mineralógicas via difração de

raios-X, nas análises químicas e nas observações na lupa binocular, além de obter melhor visualização e entendimento da fração  $<0,038\text{mm}$ .

Tomando primeiramente a fração mais grosseira,  $>0,85\text{mm}$ , confirmou-se que a absoluta maioria da amostra é composta por quartzo, estando presentes partículas com contaminações pontuais de diversos minerais, como pode ser visto na figura V.1.

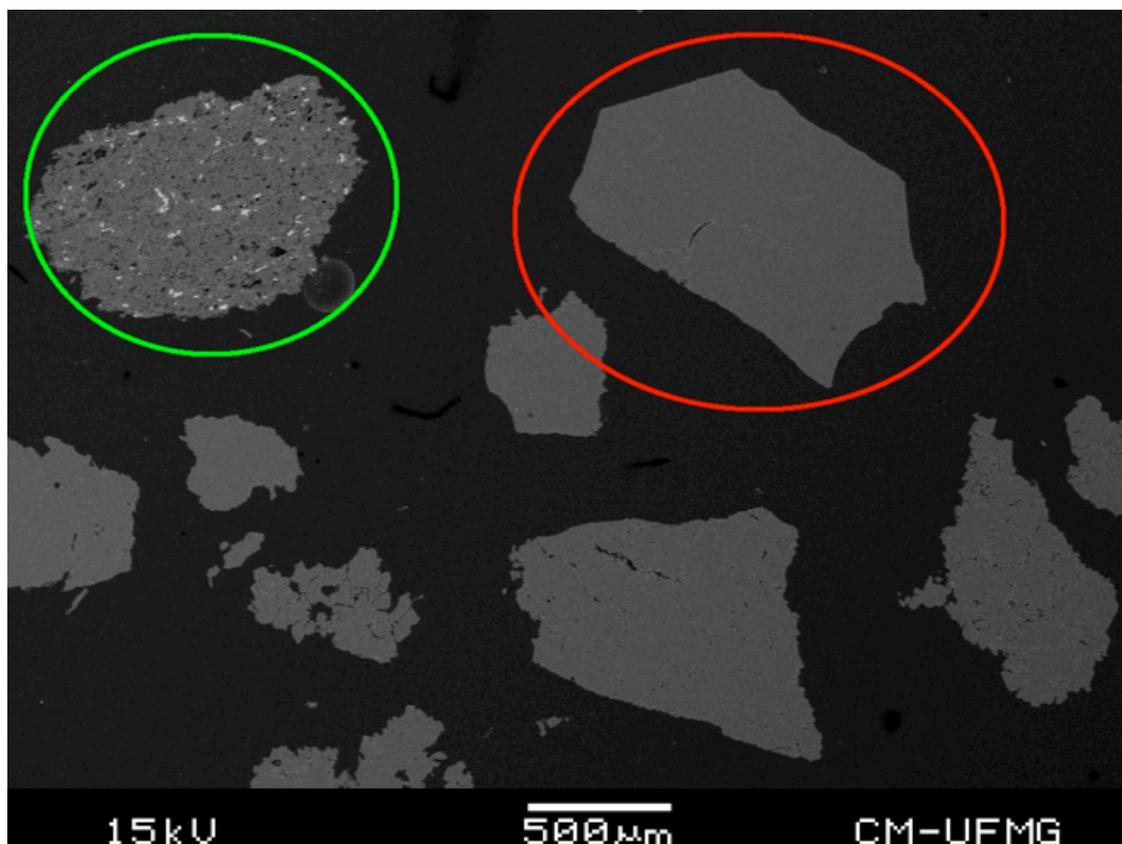


Figura V.1 (imagem 1) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração  $>0,85\text{mm}$ . Partícula de quartzo com contaminações de diversos minerais (círculo verde), e partícula de quartzo sem contaminações visíveis nesta imagem (círculo vermelho).

Quando se aproxima da partícula de quartzo contaminada, dentro do círculo verde da figura V.1, tem-se a imagem da figura V.2.

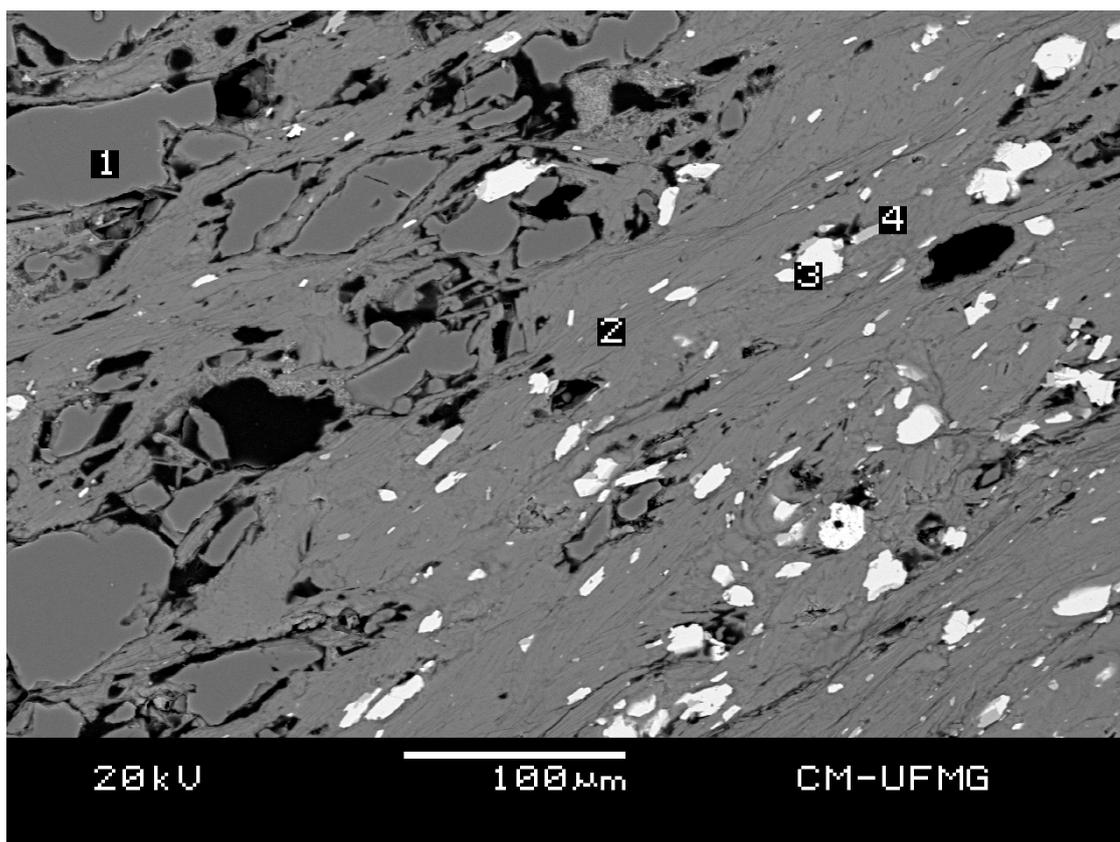


Figura V.2 (imagem 2) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm partícula 1. Área 1: grão de quartzo sem contaminação. Área 2: filossilicato (moscovita). Área 3: mineral de ferro, hematita. Área 4: mineral de titânio, rutilo (esta fração tem análise química de 0,31%  $TiO_2$ ). Microanálises mostradas na tabela abaixo.

Área	% $SiO_2$	% $Al_2O_3$	% $Fe_2O_3$	% $MgO$	% $TiO_2$	% $K_2O$	Mineral ou fase
1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Quartzo
2	52,4	24,1	6,3	1,7	1,5	14,1	Filossilicato (moscovita)
3	0,0	0,0	99,2	0,0	0,8	0,0	Hematita
4	0,0	0,0	1,6	0,0	98,0	0,4	Rutilo

A descrição da figura V.2 corrobora a descrição sob lupa binocular e com os resultados de DRX, e acrescenta a informação da origem do teor de titânio analisado nesta fração. O aspecto lamelar do filossilicato moscovita pode ser visto no detalhe da figura V.3.

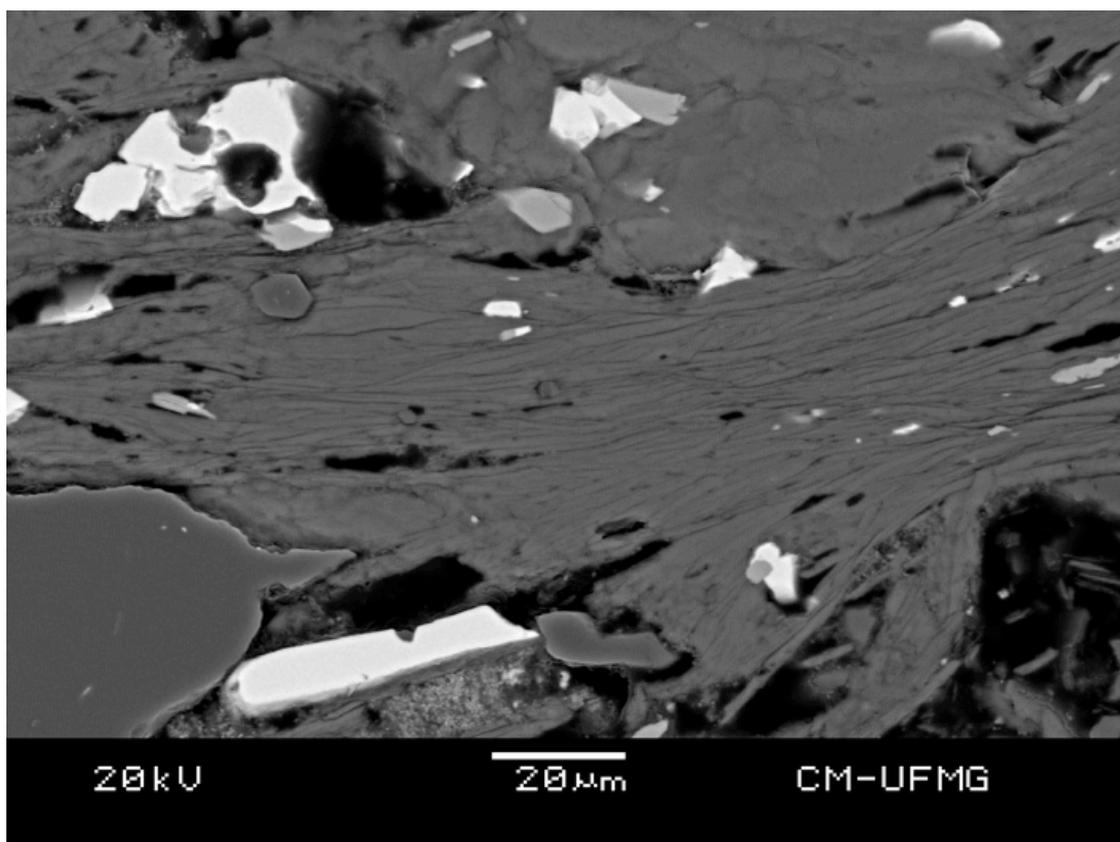


Figura V.3 (imagem 3) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, área 2. Notar aspecto lamelar do filossilicato (moscovita).

Ainda na amostra SJB01, fração >0,85mm, tem-se outra visão de outra partícula de quartzo contaminada por outros minerais, figura V.4.

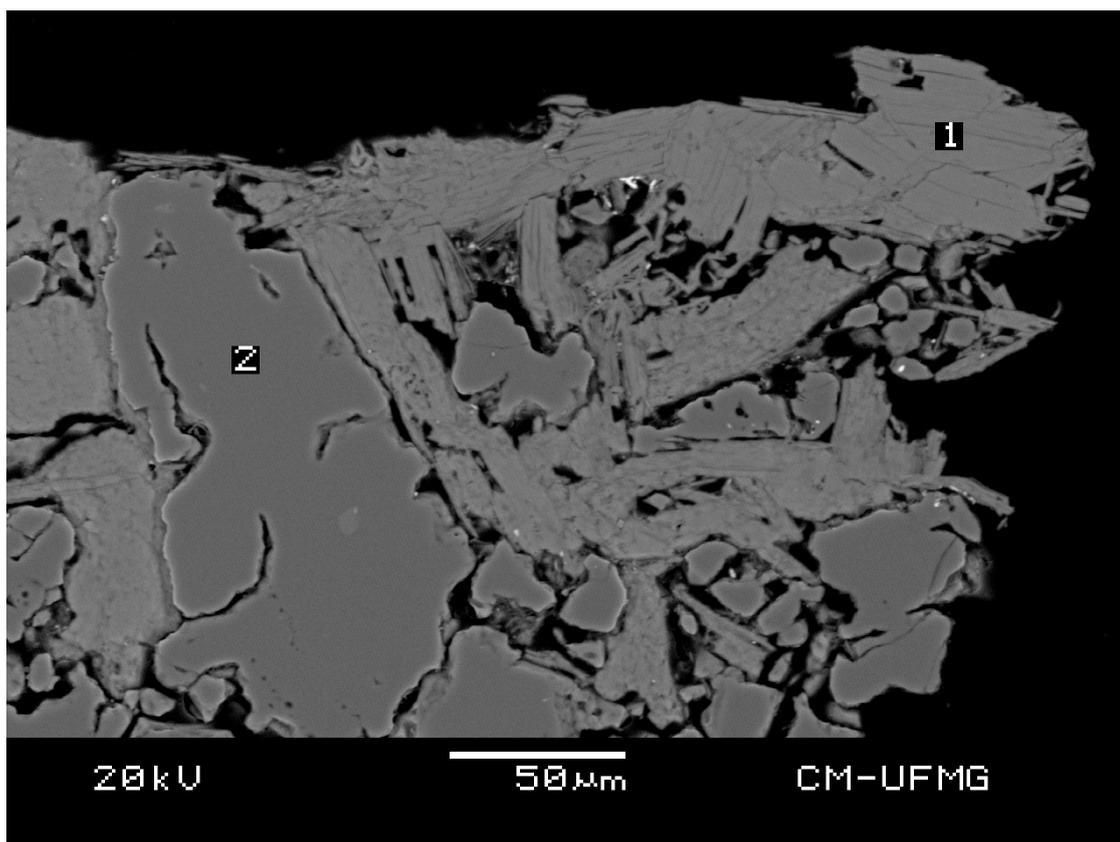


Figura V.4 (imagem 5) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, partícula 2. Área 1: filossilicato (moscovita). Área 2: grão de quartzo. As microanálises se encontram na tabela abaixo.

Área	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%K <sub>2</sub> O	Mineral ou fase
1	49,9	25,9	7,2	0,9	1,3	14,8	Filossilicato (moscovita)
2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Quartzo

Na Figura V.4, também a análise via MEV-EDS confirma a descrição de contaminação do quartzo com moscovita. Finalmente, ainda da amostra SJB01, fração >0,85mm, tem-se mais outra partícula de quartzo contaminada por outros minerais, figura V.5.

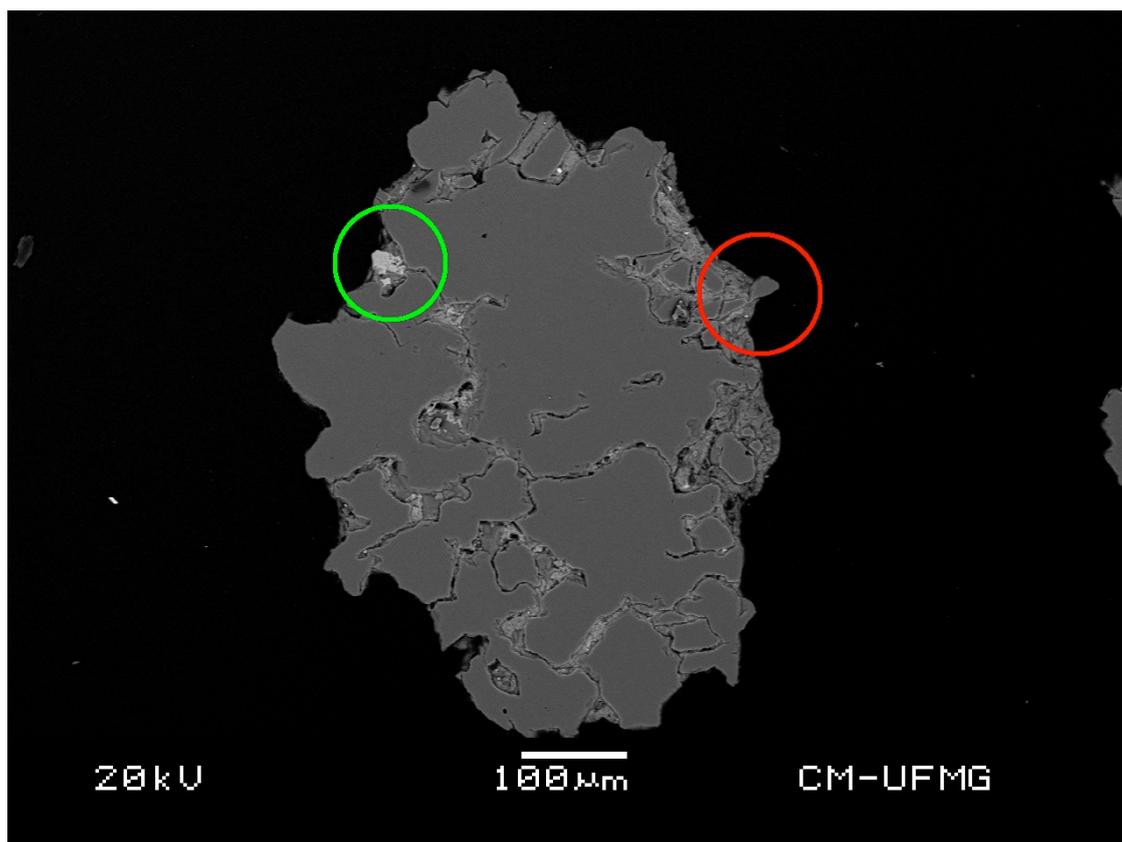


Figura V.5 (imagem 6) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, partícula 3. Típica partícula de quartzo com recobrimento de argilominerais e minerais de ferro, a ser detalhada a seguir (círculo em vermelho, figura V.6; círculo em verde, figura V.7).

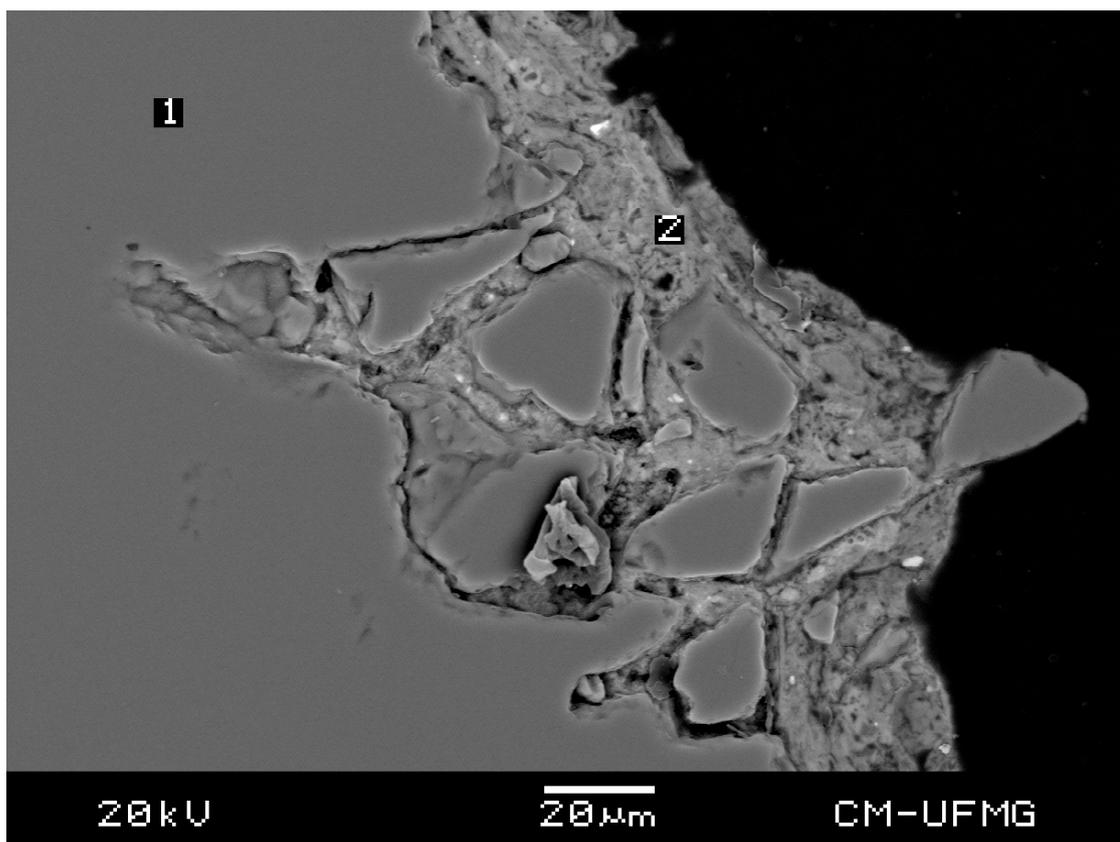


Figura V.6 (imagem 7) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, partícula 3, marcada pelo círculo vermelho na Figura V.5. Área 1: quartzo. Área 2: mistura de minerais de ferro com presença de alumínio, sílica e potássio, provável hematita com goethita, caulinita e moscovita. Recobrimento por película similar às visualizadas em lupa binocular. As microanálises se encontram na tabela abaixo.

Área	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%K <sub>2</sub> O	Mineral ou fase
1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Quartzo
2	18,4	18,1	58,7	0,2	1,1	3,5	Hematita com goethita, caulinita e moscovita

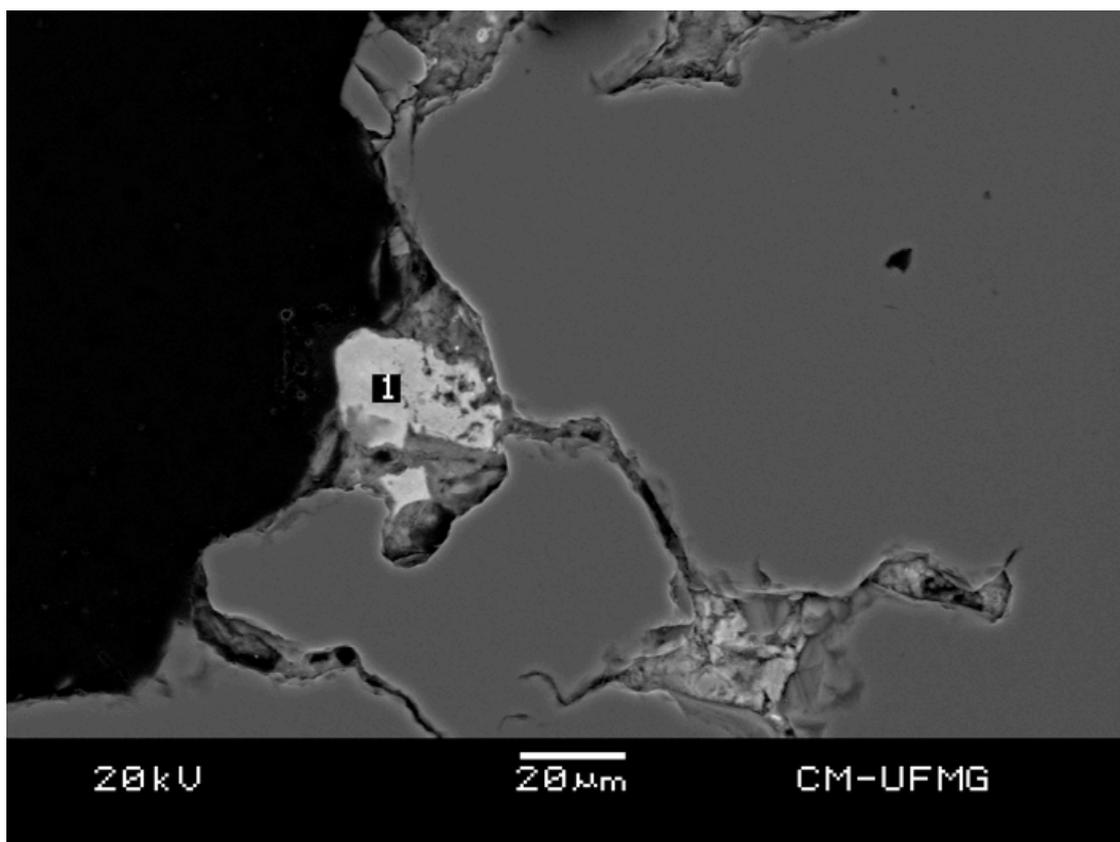


Figura V.7 (imagem 8) – Detalhe de seção polida da amostra SJB01, fração >0,85mm, partícula 3, marcada no círculo verde da figura V.5. Área 1: mineral de ferro, hematita com goethita. As microanálises se encontram na tabela abaixo.

Área	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%MgO	%V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mineral ou fase
1	1,4	10,1	87,6	0,0	0,2	0,8	Hematita/goethita

As três figuras anteriores, figuras V.5, V.6 e V.7, caracterizam com maiores detalhes contaminações que foram descritas sob lupa binocular, confirmando-as.

Em seguida, passou-se a analisar a fração <0,038mm da amostra SJB01. Esta fração, devido à limitação intrínseca da lupa binocular, não pôde ser adequadamente descrita por aquele equipamento. Até este ponto, as informações mais completas de sua composição vieram da DRX e da análise química. A figura V.8 mostra o aspecto geral desta fração.

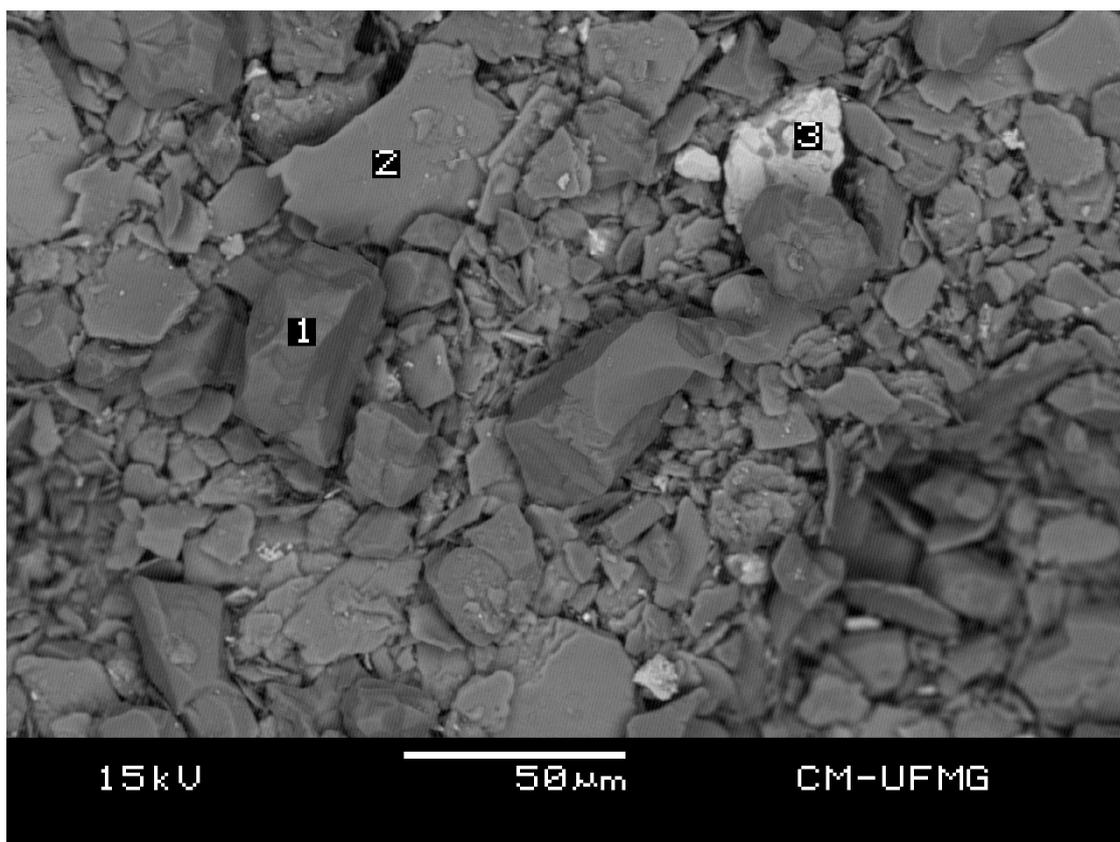


Figura V.8 (imagem 9) – Detalhe da amostra SJB01, fração  $<0,038\text{mm}$ , amostra em pó. Partícula 1: quartzo. Partícula 2: filossilicato (moscovita). Partícula 3: mineral de ferro, hematita. As microanálises se encontram na tabela abaixo.

Partícula	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%MgO	%TiO <sub>2</sub>	%K <sub>2</sub> O	Mineral ou fase
1	98,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Quartzo
2	54,6	27,5	3,1	2,8	1,1	10,9	Filossilicato (moscovita)
3	6,8	4,0	85,8	0,0	3,4	0,0	Hematita/silicato

Vê-se na figura V.8 que esta fração granulométrica é composta por quartzo em sua maioria, mineral de ferro (hematita) e moscovita. Notar que as partículas mais finas, abaixo de  $25\ \mu\text{m}$ , são quase todas similares entre si e também similares à partícula 2 (figura V.8), argilomineral do grupo das micas, quase certamente moscovita. Como a amostra SJB01 é a mais fina de todas, havia uma expectativa por parte da equipe da ERG Mineração de que seria encontrada sílica ultrafina, abaixo de  $25\ \mu\text{m}$ , neste litotipo. O que pode-se ver, na figura V.8, é uma predominância de partículas de ganga (moscovita, caulinita, e mesmo hematita/goethita), abaixo de  $25\ \mu\text{m}$ , sendo as partículas de quartzo uma minoria em meio a estas. Logo, realmente há sílica ultrafina (abaixo de

25 $\mu$ m), mas a quantidade de ganga é aparentemente superior à de quartzo. Para melhor entendimento desta questão, é necessária análise granulométrica nas faixas de subpeneiramento, utilizando Cyclosizer.

#### 5.1.5 – Determinação dos tipos de contaminação do quartzito

Um dos objetivos deste trabalho foi identificar os tipos de contaminações no quartzito. A visualização das amostras sob lupa binocular e MEV-EDS, aliada aos resultados da difração de raios-X, análises granulométricas e químicas, permitiram classificar os tipos de contaminações encontradas no quartzito. Tem-se então:

*Tipo incrustação – Contaminação do quartzo por incrustações de minerais de ferro.*

Caracterizada por pintas ou manchas de minerais de ferro (hematita e/ou goethita) incrustadas na superfície dos grânulos e grãos de quartzo. O aspecto geral destas incrustações pode ser visto nas figuras V.9 e V.10.



Figura V.9 (foto 35) – Amostra SJB02, fração >1,7mm (>12# Tyler), 10x aumento, detalhe 3: partícula de quartzo leitoso incrustada com minerais de ferro, ao centro.

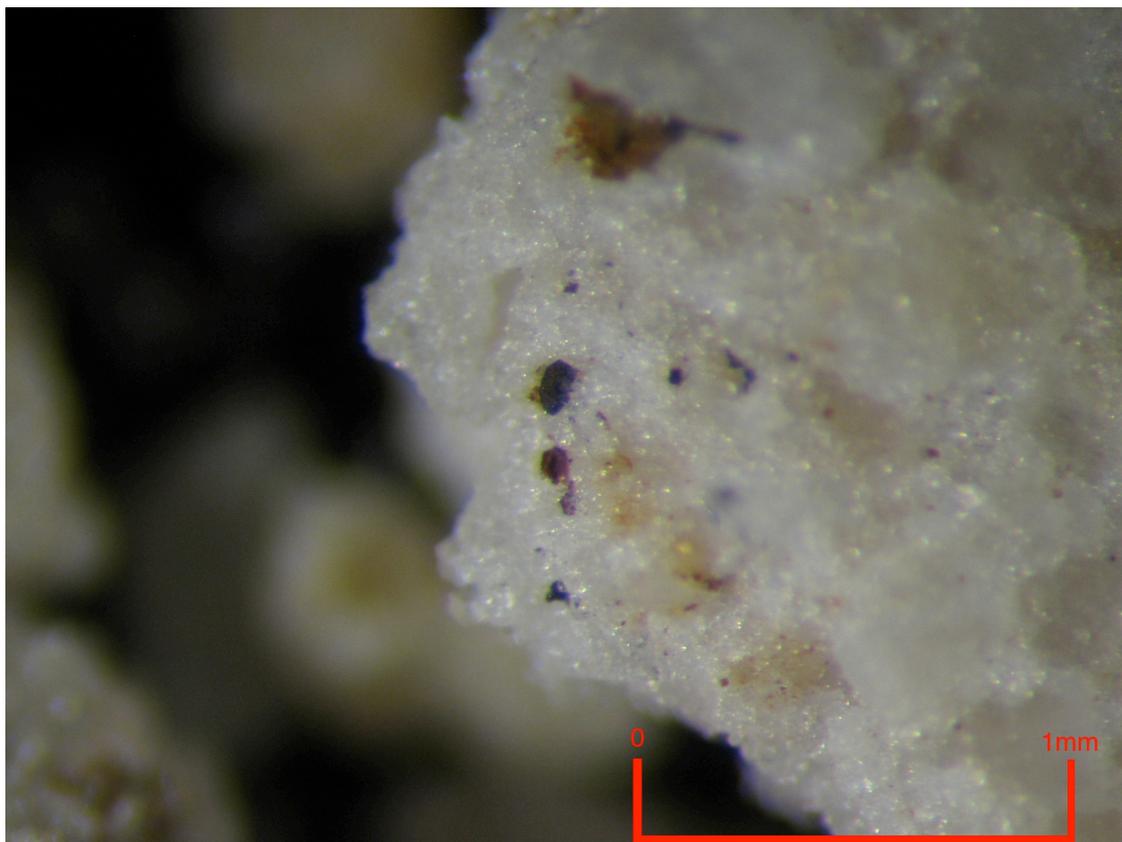


Figura V.10 (foto 77) – Amostra SJB04, fração >1,7mm (>12# Tyler), 40x aumento, detalhe 4. Maior aumento de um grânulo de quartzo leitoso coeso, com pontos de minerais de ferro. Possivelmente este tipo de contaminação somada às partículas amareladas responde pelo teor de 0,87%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nesta fração.

*Tipo película – Contaminação do quartzo por película de minerais de ferro e argilominerais.*

Caracterizada por ser quase uma “pintura” amarelada nas partículas de quartzo, este tipo de contaminação é uma película de minerais de ferro e/ou argilominerais aderida à superfície das partículas de quartzo. O aspecto geral destas películas pode ser visto nas figuras V.11 e V.12.



Figura V.11 (foto 60) – Amostra SJB03, fração  $>0,212\text{mm}$  ( $>70\#$  Tyler), 40x aumento, detalhe 1. Grânulos de quartzo amarelados em meio a outros leitosos. Nesta imagem pode-se ver que os grânulos são praticamente pintados de amarelo: contaminação com minerais de ferro e/ou argilominerais.

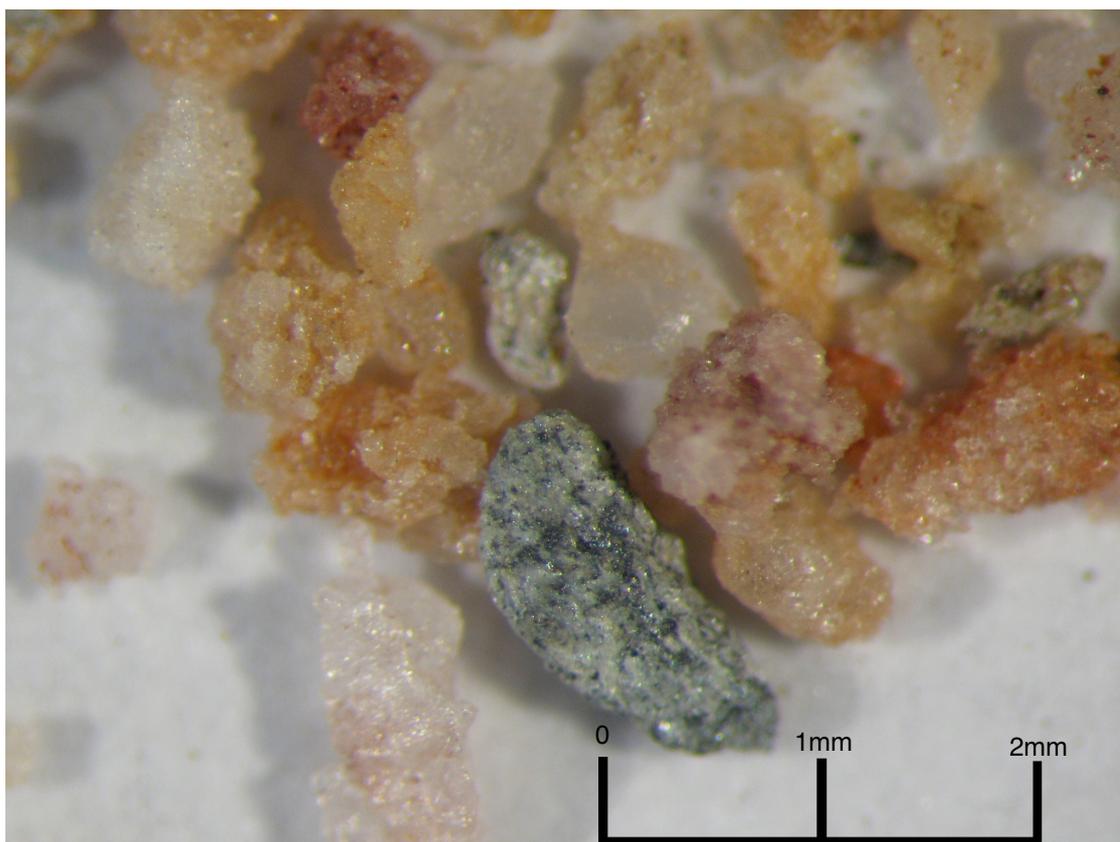


Figura V.12 (foto 7) – Amostra SJB01, fração >0,71mm (>24# Tyler), 20x aumento, detalhe 2. Notar partículas de quartzo com película de minerais de ferro e/ou argilominerais. Também aqui há um xenogrão de itabirito na porção inferior da foto.

*Tipo minerais de ferro – Contaminação do quartzito por minerais de ferro liberados*

Caracterizada pela presença de partículas de minerais de ferro (hematita e goethita) liberadas em meio ao quartzito. O aspecto geral deste tipo de contaminação pode ser visto nas figuras V.13 e V.14.

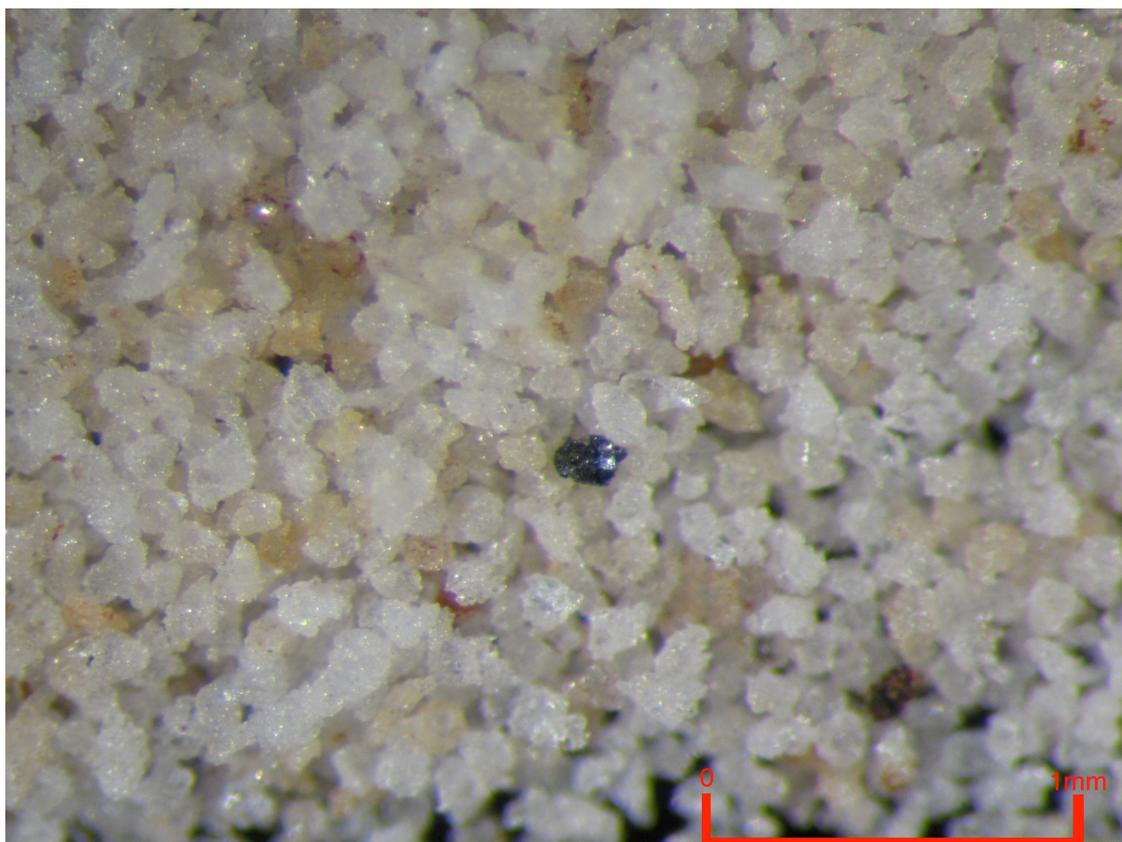


Figura V.13 (foto 90) – Amostra SJB04, fração  $>0,106\text{mm}$  ( $>140\#$  Tyler), 40x aumento, detalhe 1. Nesta fração da amostra SJB04 há pouquíssima presença de minerais de Fe, estando sempre liberados, como no centro da foto.

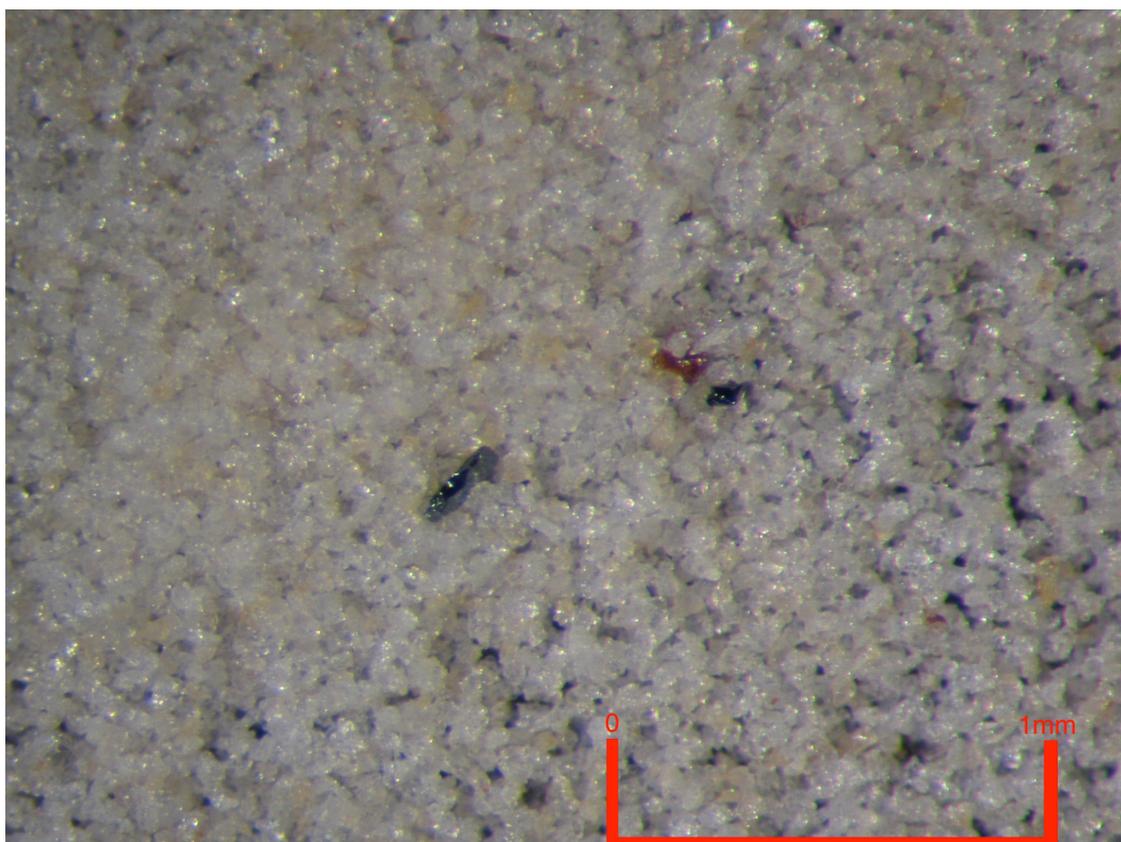


Figura V.14 (foto 67) – Amostra SJB03, fração  $>0,045\text{mm}$  ( $>325\#$ ), 40x aumento, detalhe 2. No centro, notar partícula de possível mineral de ferro, com brilho metálico e cor negro-acinzentada, característicos da hematita.

*Tipo xenopartículas – Contaminação do quartzito por xenopartículas*

Aqui foram agrupadas todas aquelas partículas que foram encontradas e descritas, as quais não pertencem normalmente à assembleia de minerais de um quartzito típico ou são realmente fragmentos de outras rochas. O aspecto geral deste tipo de contaminação pode ser visto nas figuras V.15 e V.16. Este tipo de contaminação só foi detectada nas frações grosseiras da amostra SJB01 ( $>0,5\text{mm}$ ) e na fração  $>1,7\text{mm}$  da amostra SJB02. Ou seja, tende a desaparecer na medida em que se afasta do contato com o filito e entra-se no cerne do quartzito Taboões.

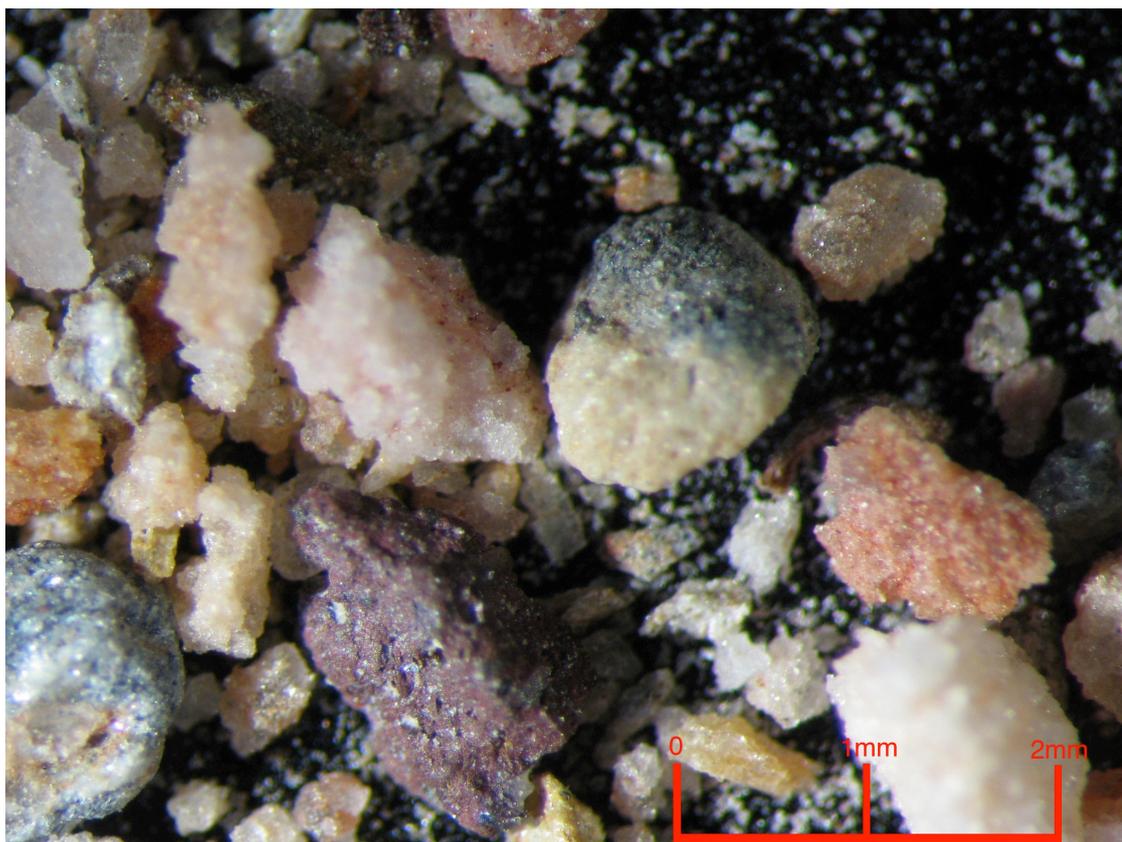


Figura V.15 (foto 5) – Amostra SJB01, fração  $>0,85\text{mm}$  ( $>20\#$  Tyler), 20x aumento, detalhe 3. Presença de fragmento de itabirito no canto inferior esquerdo da foto, uma partícula mista de quartzo e mineral de ferro ao centro e partícula de mineral de ferro na porção inferior central.



Figura V.16 (foto 1) – Amostra SJB01, fração >1,7mm (>12# Tyler), 10x aumento, detalhe 1. Presença de dois fragmentos de itabirito no canto inferior direito da foto, e outro no canto inferior esquerdo.

## 5.2 – Testes de processamento mineral

Uma vez estabelecidos os tipos de contaminação do quartzito, partiu-se para alguns ensaios visando verificar a viabilidade técnica de redução de contaminações. Considerando que as especificações de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  contido para produção de vidros mais comuns variam de 0,02% (vidro Oklahoma e Fontainebleau) até 0,04%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (vidro plano), e que as especificações de alumina contida variam de 0,057%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (vidro Loch Aline), a 3,779%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (vasilhame de vidro Califórnia), procurou-se reduzir os teores destes contaminantes do quartzito, nesta fase, sem cominuição.

A linha adotada para os testes de processamento mineral foi evitar cominuição do quartzito antes da atrição e separação magnética, já que:

- As contaminações representam, em massa, uma fração pequena do quartzito.

- Em tese, contaminações do tipo incrustações (incrustações de minerais de ferro no quartzo) teriam pequena possibilidade de se liberarem do quartzo via cominuição e isto ainda precisa ser testado.
- Em nada ajudaria a cominuição para eliminar ou reduzir as contaminações do tipo película (fina película de minerais de ferro e argilominerais sobre partículas de quartzo).
- Nas contaminações do tipo minerais de ferro (minerais de ferro liberados em meio ao quartzito), estes já se encontram liberados das partículas de quartzo.
- As contaminações do tipo xenopartículas (contaminações do quartzito por xenopartículas) somente apareceram nas frações mais grosseiras (acima de 0,5mm) das amostras SJB01 e SJB02. Cominuir o quartzito somente distribuiria estas contaminações para as demais frações mais finas.
- As quatro amostras se mostraram com uma grande dispersão granulométrica, o que já torna o quartzito *in natura* interessante em termos de produtos potenciais para as diversas indústrias consumidoras.

Decidiu-se então utilizar atrição (visando diminuir o teor de ferro devido à contaminação tipo película), seguida por separação magnética (para os demais tipos de contaminação).

Importante notar que, para o mercado de sílica para usos industriais, quanto mais baixo o teor de ferro, principalmente, maior o valor agregado do produto. Desta forma, as pequenas perdas de massa resultantes da remoção de minerais de ferro e de alumina são recompensadas, em muito, pelo aumento do valor dos concentrados com baixos teores de contaminantes.

Os resultados de análises das composições obtidas para os testes se encontram na tabela V.19.

Tabela V.19 – Resultados de análises químicas dos composições

	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	MnO %	PPC %
Composição AM01	95,7	1,20	<b>2,46</b>	0,02	0,13	0,07	0,01	<0,1	0,36	0,02	-0,17
Composição AM03	98,9	0,23	<b>1,06</b>	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,02	-0,38

Nota-se nos resultados que os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  estão acima dos esperados nas composições. Como foram obtidas a partir de quarteamento de frações granulométricas no intervalo de  $<0,5\text{mm}$  a  $>0,075\text{mm}$ , esperava-se obter como resultados de análises a média ponderada de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Para a composição AM01, o resultado global para  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foi dentro do esperado (1,14%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para média ponderada versus 1,20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para a análise obtida), mas deveria ter sido obtido algo próximo a 1,24%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e o resultado obtido realmente foi 2,46%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Para a composição AM03, o resultado global para  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foi também dentro do esperado (0,21%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para média ponderada versus 0,23%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para a análise obtida), mas deveria ter sido obtido algo próximo a 0,11%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e o resultado obtido realmente foi 1,06%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Provavelmente houve algum problema durante a tomada de alíquotas de cada uma das frações granulométricas para formar as composições, de modo similar ao que acontece com amostras de minérios de ouro, devido ao “efeito pepita”, como descrito por LADEIRA (2007). Numa amostra na qual existe uma grande diferença de teores entre os minerais presentes, como é o caso do quartzo (0%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a hematita (teoricamente 100%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) no quartzito, em granulometrias relativamente grosseiras, com é o caso da amostra em estudo, sem cominuição prévia, a tomada de alíquotas por amostragem pode resultar em teores para estas dissimilares aos da amostra inicial. Com a alumina, este fato não se deu, pois ela se concentra predominantemente nas micas, que se encontram intemperizadas em partículas finas, menos sujeitas a este efeito.

Este fato não invalida os testes de processamento realizados, uma vez que o objetivo dos mesmos foi avaliar se haveria redução de contaminantes nas amostras após atrição e separação magnética.

#### 5.2.1 – Testes de atrição/escrubagem

Seguindo a metodologia descrita, os testes de atrição/escrubagem foram realizados. De cada uma das duas composições iniciais (composição AM01 e composição AM03), foram obtidas quatro amostras resultantes dos testes, denominadas segundo o reagente utilizado durante os testes de atrição/escrubagem (silicato de sódio, hidróxido de sódio e

ácido cítrico), ou segundo a ausência destes reagentes (teste em branco). As tabelas V.20 e V.21 resumem os resultados de análises destas amostras envolvidas nos testes.

Tabela V.20 – AM01: Resultados de análises químicas das amostras submetidas aos testes de atrição

	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	MnO %	PPC %
Composição AM01	95,7	1,20	<b>2,46</b>	0,02	0,13	0,07	0,01	<0,1	0,36	0,02	-0,17
AM01 BRANCO	98,0	1,17	<b>1,83</b>	0,02	0,11	0,07	0,01	<0,1	0,30	0,02	0,20
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>25,6%</b>								
AM01 SILICATO	94,7	1,14	<b>2,31</b>	0,01	0,11	0,06	<0,01	0,11	0,34	0,01	-0,03
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>6,1%</b>								
AM01 NAOH	97,0	1,16	<b>1,86</b>	0,02	0,11	0,08	0,01	<0,1	0,36	0,01	0,16
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>24,4%</b>								
AM01 CITRICO	97,9	1,23	<b>1,90</b>	0,03	0,12	0,06	0,01	<0,1	0,36	0,01	0,15
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>22,7%</b>								

Tabela V.21 – AM03: Resultados de análises químicas das amostras submetidas aos testes de atrição

	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	MnO %	PPC %
Composição AM03	98,9	0,23	<b>1,06</b>	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,02	-0,38
AM03 BRANCO	98,6	0,26	<b>0,94</b>	0,02	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	0,01	-0,39
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>11,7%</b>								
AM03 SILICATO	98,4	0,32	<b>0,93</b>	0,03	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	0,02	-0,33
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>12,3%</b>								
AM03 NAOH	>99	0,17	<b>0,95</b>	0,02	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,01	-0,31
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>10,3%</b>								
AM03 CITRICO	97,2	0,15	<b>0,94</b>	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	-0,22
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>11,7%</b>								

A redução do teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi calculada usando a equação V.5.

$$\text{Redução} = \frac{\text{Teor na composição}}{\text{Teor após processamento}} * 100$$

Equação V.5 – Fórmula para cálculo da redução de teor após processamento.

O pior desempenho na redução de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na composição AM01 foi obtido com o reagente silicato de sódio, e o melhor desempenho foi no teste em branco. Os demais

reagentes tiveram desempenho muito semelhante para a composição AM01. Já para a composição AM03, o melhor desempenho foi obtido com o reagente silicato de sódio, que é o reagente comumente usado no processamento de arenitos em São Paulo para a indústria vidreira, mas todos os resultados de redução dos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foram muito semelhantes.

Isto leva a crer que, nestes testes, o efeito da agitação mecânica na atrição foi mais importante para a redução de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  do que o tipo de reagente utilizado, algo que precisa ser mais bem estudado.

O fato de ter havido redução de teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com atrição abre perspectivas para continuidade dos estudos desta metodologia para redução de contaminações no quartzito.

#### 5.2.2 – Testes de separação magnética

Seguindo a metodologia descrita, foram realizados os testes de separação magnética, sendo a alimentação de cada um destes testes os produtos dos testes de atrição, para cada reagente e para o teste em branco. Geraram-se então frações não-magnéticas, que foram analisadas, e frações magnéticas, em quantidades insuficientes para análises químicas. Isto confirma o que foi afirmado anteriormente: as contaminações representam uma pequena fração da massa do quartzito. As tabelas V.22 e V.23 resumem os resultados de análises destas amostras envolvidas nos testes.

Tabela V.22 – AM01: Resultados de análises químicas das amostras submetidas à separação magnética

	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	MnO %	PPC %
AM01 BRANCO	98,0	1,17	<b>1,83</b>	0,02	0,11	0,07	0,01	<0,1	0,30	0,02	0,20
AM01 BRANCO NAO MAG	94,6	1,00	<b>1,67</b>	0,02	0,10	0,07	<0,01	<0,1	0,35	<0,01	0,18
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>8,7%</b>								
AM01 SILICATO	94,7	1,14	<b>2,31</b>	0,01	0,11	0,06	<0,01	0,11	0,34	0,01	-0,03
AM01 SILICATO NAO MAG	97,2	1,07	<b>1,87</b>	0,02	0,12	0,05	0,01	<0,1	0,33	0,01	0,09
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>19,0%</b>								
AM01 NAOH	97,0	1,16	<b>1,86</b>	0,02	0,11	0,08	0,01	<0,1	0,36	0,01	0,16
AM01 NAOH NAO MAG	97,1	1,13	<b>1,56</b>	0,04	0,13	0,06	0,01	<0,1	0,35	0,01	0,27
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>16,2%</b>								
AM01 CITRICO	97,9	1,23	<b>1,90</b>	0,03	0,12	0,06	0,01	<0,1	0,36	0,01	0,15
AM01 CITRICO NAO MAG	96,1	1,08	<b>1,52</b>	0,02	0,11	0,07	0,01	<0,1	0,33	0,01	0,00
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>20,3%</b>								

Tabela V.23 – AM03: Resultados de análises químicas das amostras submetidas à separação magnética

	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	MnO %	PPC %
AM03 BRANCO	98,6	0,26	<b>0,94</b>	0,02	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	0,01	-0,39
AM03 BRANCO NAO MAG	>99	0,18	<b>0,46</b>	0,02	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,02	0,01	-0,08
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>51,1%</b>								
AM03 SILICATO	98,4	0,32	<b>0,93</b>	0,03	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,04	0,02	-0,33
AM03 SILICATO NAO MAG	97,3	0,17	<b>0,75</b>	0,02	<0,1	0,01	<0,01	0,14	0,03	<0,01	-0,23
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>19,3%</b>								
AM03 NAOH	>99	0,17	<b>0,95</b>	0,02	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,01	-0,31
AM03 NAOH NAO MAG	98,5	0,16	<b>0,82</b>	0,03	<0,1	<0,01	0,01	<0,1	0,03	0,02	-0,31
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>13,5%</b>								
AM03 CITRICO	97,1	0,15	<b>0,94</b>	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,02	<0,01	-0,22
AM03 CITRICO NAO MAG	97,2	0,17	<b>0,74</b>	0,02	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,01	-0,28
Redução de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			<b>20,6%</b>								

A redução do teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi calculada usando a fórmula da equação V.5.

O melhor desempenho na redução de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na composição AM01 foi obtido para a amostra que veio da atrição com ácido cítrico. Já para a composição AM03, o melhor desempenho foi obtido com a amostra que veio do teste de atrição em branco.

A despeito das quantidades de amostra das frações magnéticas terem sido insuficientes para análise química, oito delas forneceram quantidades suficientes para serem

visualizadas sob lupa binocular. As figuras V.17 e V.18 ilustram as frações magnéticas de, respectivamente, AM01 Branco e AM01 NaOH.

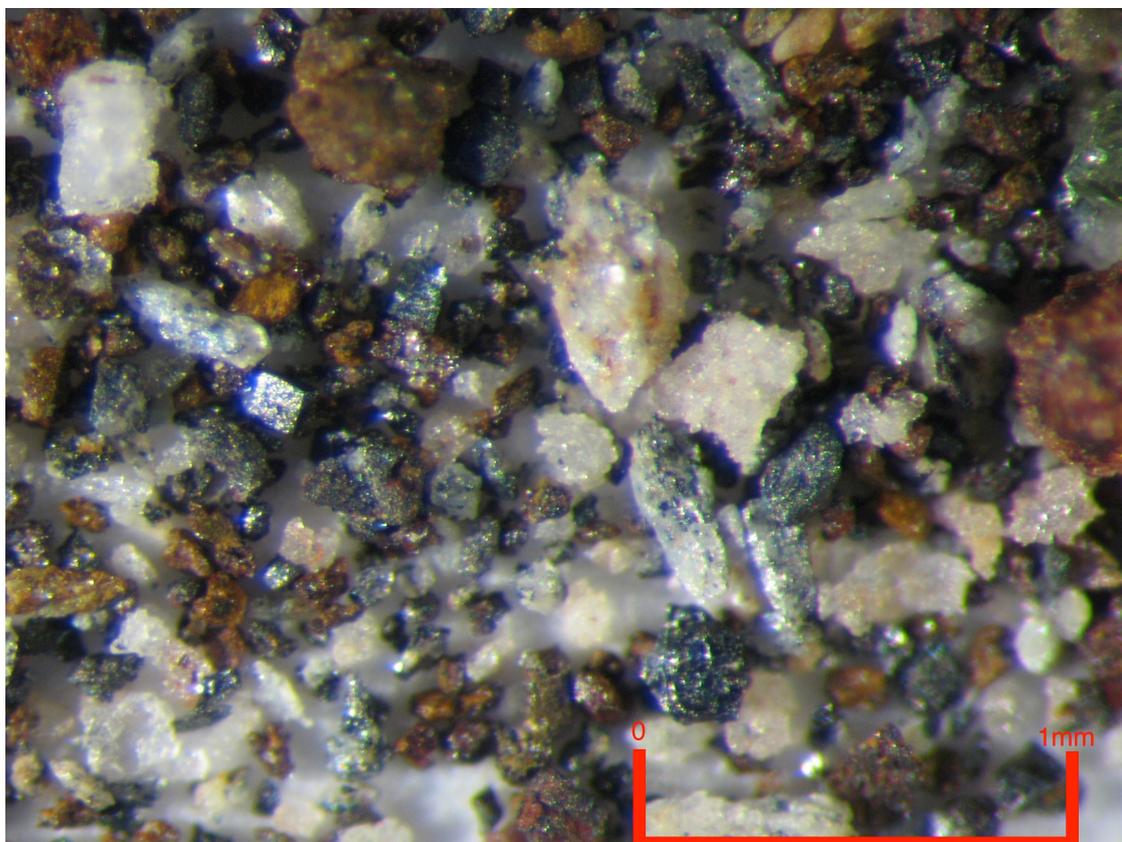


Figura V.17 (foto 25) – Amostra SJB01, composição AM01, intervalo  $-0,5+0,075$ mm, fração magnética, teste de separação magnética pós-atricção (sem reagente, teste em branco), 40x aumento, detalhe 1: partículas de minerais de ferro capturadas pelo campo magnético, hematitas, possíveis goethitas, partículas mistas com quartzo, partículas de quartzo com apenas alguns pontos de incrustação.

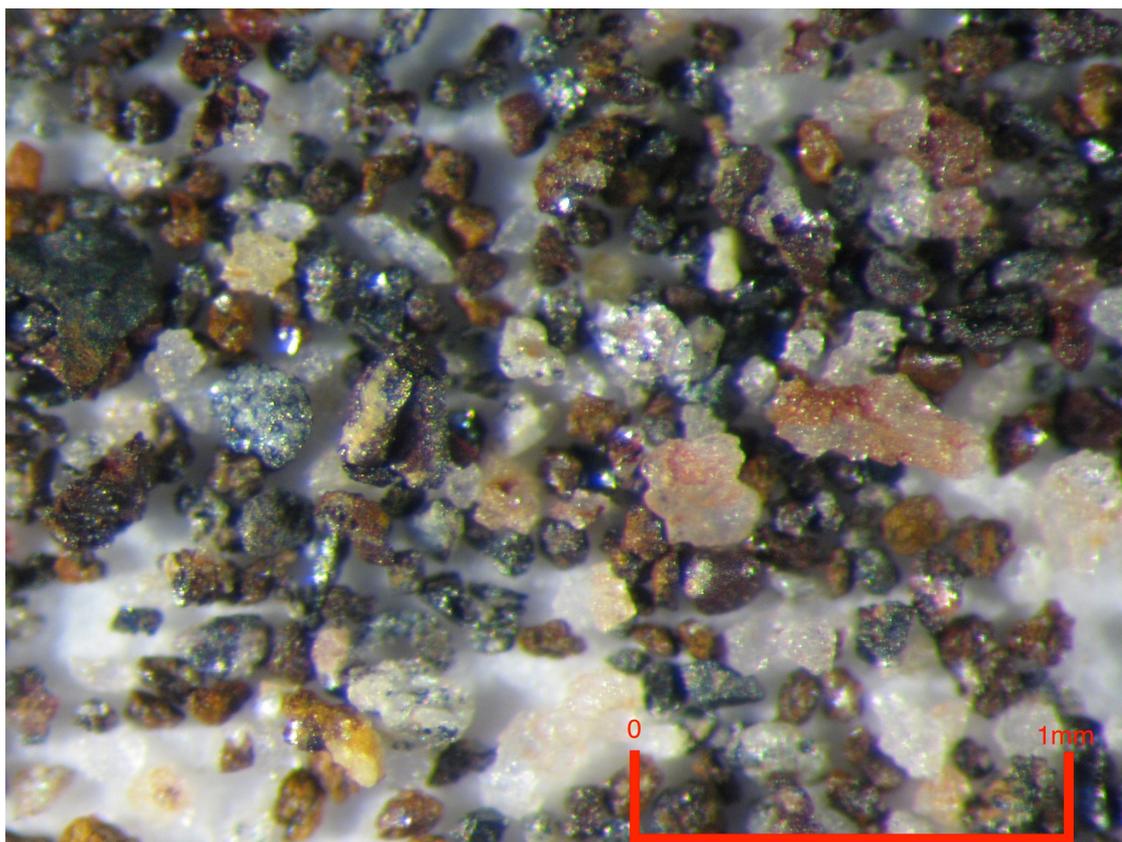


Figura V.18 (foto 27) – Amostra SJB01, composição AM01, intervalo  $-0,5+0,075$ mm, fração magnética, teste de separação magnética pós-atrição com NaOH, 40x aumento, detalhe 1: partículas de minerais de ferro capturadas pelo campo magnético, hematitas, possíveis goethitas, partículas de quartzo com apenas alguns pontos de incrustação (como a do centro da foto). Em algumas partículas de quartzo, não foi visualizado o ponto de incrustação com mineral de ferro, quer seja por estar em local não visível da partícula na foto, quer seja por ter sido a partícula capturada por arraste de outras ferromagnéticas/paramagnéticas.

Em todas as visualizações das frações magnéticas há um ponto em comum: foram capturadas todas as partículas que ou eram de mineral de ferro ou tinham algum mineral de ferro incrustado, mesmo quando a incrustação era tão pequena que não foi visualizada na imagem. Isto se deve a alta intensidade do campo utilizada (21kGauss).

Segundo SVOBODA (1994), a eficiência da captura pelo campo magnético é determinada pela ação conjunta da interação magnética dipolar entre a matriz e as partículas, pela tensão de cisalhamento hidrodinâmica e por forças superficiais. A intensidade do campo magnético e o gradiente do campo são de importância secundária, e tentativas de maximizar a força de arraste magnética não somente não aumenta a



Tabela V.25 – AM03: Resultado final do procedimento de atrição seguida por separação magnética

	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	MnO %	PPC %
Composição AM03	98,9	<b>0,23</b>	<b>1,06</b>	0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,02	-0,38
AM03 BRANCO NAO MAG	>99	<b>0,18</b>	<b>0,46</b>	0,02	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,02	0,01	-0,08
Redução de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		<b>21,7%</b>	<b>56,8%</b>								
AM03 SILICATO NAO MAG	97,3	<b>0,17</b>	<b>0,75</b>	0,02	<0,1	0,01	<0,01	0,14	0,03	<0,01	-0,23
Redução de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		<b>26,1%</b>	<b>29,2%</b>								
AM03 NAOH NAO MAG	98,5	<b>0,16</b>	<b>0,82</b>	0,03	<0,1	<0,01	0,01	<0,1	0,03	0,02	-0,31
Redução de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		<b>30,4%</b>	<b>22,4%</b>								
AM03 CITRICO NAO MAG	97,2	<b>0,17</b>	<b>0,74</b>	0,02	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,03	0,01	-0,28
Redução de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		<b>26,1%</b>	<b>29,9%</b>								

Para ambas as amostras, houve reduções de teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> usando esta rota de processo. Em termos de especificações químicas, os concentrados da amostra AM01 não se adequam às especificações da indústria vidreira. Já o concentrado da amostra AM03, teste em branco, já atende às especificações químicas para a produção de fibra de vidro (tabelas III.2a e III.2b), apesar de não atender ainda às especificações para os demais produtos da indústria vidreira.

Para a amostra AM01, a redução de teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi por volta de 30%. Exceto pelo teste em branco da amostra AM03, que teve o melhor desempenho de todos na separação magnética, o resultado geral de redução de ferro para a amostra AM03 ficou em torno de 25%.

A redução de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi maior para a amostra AM03, a menos contaminada por alumina dentre as duas testadas.

Este tipo de resultado mostra que a rota de processo de atrição seguida por separação magnética é promissora para fins de redução de contaminantes visando atender à indústria vidreira e mesmo à outras indústrias menos exigentes quanto às especificações químicas.

O fato de ter havido boa redução de teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na atrição sem reagente algum (tabela V.17) mostra que é preciso se estudar mais a atrição, em termos de dosagem de reagentes e intensidade da agitação mecânica.

Os resultados de redução de teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  via separação magnética estimulam aprofundamentos nos estudos desta rota, variando os parâmetros de intensidade de campo e avaliando os benefícios de separação em mais estágios.

## 6 – Conclusões

- Os litotipos de quartzito são apenas dois: quartzito argiloso (transição do filito para quartzito) e quartzito (típico do cerne da Formação Taboões).
- A assembleia de minerais que compõe o quartzito é: quartzo, hematita, goethita, moscovita, caulinita.
- Há uma diminuição da quantidade de finos, quando se caminha de oeste para leste na jazida, da amostra SJB01 para SJB04. Isto é devido à diminuição da quantidade relativa de argilominerais quando se passa gradualmente do quartzito argiloso para o quartzito.
- Há contaminações de  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  em todas as faixas granulométricas das amostras SJB01 a SJB04, associadas à presença de minerais de ferro e argilominerais, que tornam o quartzito *in natura* inadequado para uso imediato para fins industriais, sendo necessários ajustes via tratamento de minérios para adequação às especificações levantadas na revisão bibliográfica.
- O litotipo quartzito necessita menores adequações às especificações químicas e granulométricas que o litotipo quartzito argiloso para a indústria vidreira.
- O grau de esfericidade das partículas de quartzo varia de 0,5 a 0,9, mas o arredondamento varia de 0,3 a 0,5, o que torna esta areia inadequada para o uso como propante, segundo critério da API.
- A textura das partículas de quartzo varia de irregular (frações >0,075mm) a sacaroide.
- Há no quartzito argiloso presença de partículas epigenéticas incorporadas por processos de metamorfismo (basculamento) seguindo por erosão, como os itabiritos, aqui denominadas xenopartículas. Esta presença vai diminuindo na medida em que se afasta do contato com o filito, passando de quartzito argiloso para quartzito.
- Nos quartzitos foram identificados quatro tipos de contaminações: *tipo minerais de ferro*, caracterizada pela presença de partículas de minerais de ferro (hematita e goethita) liberadas em meio ao quartzito; *tipo incrustação*, caracterizada por pintas ou manchas de minerais de ferro (hematita e/ou goethita) incrustadas na superfície dos grânulos e grãos de quartzo; *tipo película*, caracterizada pela presença de uma película

de minerais de ferro e/ou argilominerais aderida à superfície das partículas de quartzo; *tipo xenopartículas*, caracterizada pela presença de partículas que não pertencem normalmente à assembleia de minerais de um quartzito típico ou são de outras rochas.

- Estas contaminações representam uma pequena fração em massa do quartzito.
- Há ocorrência natural de sílica ultrafina (abaixo de  $25\mu\text{m}$ ) no quartzito argiloso, mas a visualização no MEV indica que ela se apresenta numa quantidade menor que a dos minerais de ganga.
- A presença de xenopartículas (contaminação tipo xenopartículas) nas frações granulométricas mais grosseiras das amostras SJB01 e SJB02 implica em ser desinteressante iniciar o processamento mineral com cominuição do quartzito nas áreas mais próximas ao contato com o filito e no quartzito argiloso, pois esta contaminação passaria a ser incorporada às demais frações granulométricas.
- A existência da contaminação tipo incrustação, caracterizada pela presença pontual de minerais de ferro aderidos à superfície do quartzo, é mais uma razão para apoiar a rota de processamento sem cominuição no início.
- O fato de ter havido boa redução de teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na atrição sem reagente algum (tabela V.18) mostra que é preciso se estudar mais a atrição, em termos de dosagem de reagentes e intensidade da agitação mecânica.
- A rota de processamento escolhida, de atrição seguida por separação magnética, mostrou ser tecnicamente viável para redução de teores dos contaminantes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
- A rota de beneficiamento sugerida para o quartzito é: desagregação/destorroamento utilizando um britador de mandíbulas bem aberto, seguida por peneiramento a úmido; as frações de interesse para cada indústria seguiriam para processos separados e, em alguns deles, haveria atrição e separação magnética.

## **7 – Relevância dos resultados**

Quando se considera que é essencial o máximo aproveitamento dos recursos minerais, que é imperativa a utilização de processos sustentáveis para a extração e aproveitamento de areias quartzosas e que é muito baixo o nível de conhecimento dos quartzitos da Formação Taboões dentro da área da ERG Mineração, como matéria-prima para uso industrial, a caracterização realizada nestes quartzitos foi muito importante.

Também são relevantes os resultados aqui apresentados, por ser este projeto o primeiro trabalho de caracterização dos quartzitos da Formação Taboões em São Joaquim de Bicas – MG objetivando seu aproveitamento industrial.

## 8 – Sugestões para trabalhos futuros

- Testar níveis diferentes de dosagem dos reagentes hidróxido de sódio, ácido cítrico e silicato de sódio na atrição, bem como o tempo e intensidade da mesma, para se verificar a viabilidade econômica e técnica do uso destes reagentes.
- Testes com novos reagentes na atrição, uma vez que a possibilidade de redução da contaminação tipo película parece ser alta, e pode ser interessante testar algum tipo de ataque ácido.
- Estudar rota de processamento para aplicação de frações do quartzito como areia de fundição.
- Variar os parâmetros da separação magnética, testando intensidades diferentes e mais estágios de separação buscando melhores resultados.
- Testar separação magnética a seco, tanto por ser de menor custo operacional quanto por existirem especificações granulométricas menos exigentes para areias industriais.
- Aplicar análise granuloquímica nas frações de subpeneiramento, abaixo de 0,038mm, utilizando o Cyclosizer, para maior entendimento do comportamento e abundância relativa de sílica ultrafina (abaixo de 25 $\mu$ m), muito valorizada no mercado. Testar metodologias para concentração da sílica ultrafina nesta faixa granulométrica.

## Referências Bibliográficas

ALENCAR, E. L. L. **Química e mineralogia de três pedons originários de calcário na Chapada do Apodi – CE.** 2002. 61p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

ALMEIDA REGO, F. C. **Sistema de Beneficiamento de Areia para Fins Industriais.** 2005. 58 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Escola de Química da UFRJ, Rio de Janeiro.

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 4, p. 349-364. 1977.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Províncias Estruturais Brasileiras. *In*: SBG, 8<sup>o</sup> Simpósio de Geologia do Nordeste. Campina Grande, *Anais*, p.363-391. 1977.

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 1-2, n. 90, p. 29-58, Jan.1998.

AS MINAS GERAIS. **O Quadrilátero Ferrífero.** Disponível em: <http://www.asminasgerais.com.br/?item=ALBUM&codAlbum=119>. Acesso em: 03 nov. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.140:** Materiais usados em fundição – Cálculo das características granulométricas. Rio de Janeiro, Abril, 1992. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.672:1992:** Areia-padrão para ensaios em fundição – Especificação. Rio de Janeiro, Outubro, 1992. 2p.

BARBOSA, A. L. M. **Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero**. SBG – MG, reimpressão (1985). Belo Horizonte: UFMG, Inst. Geoc., Depto. Geol., 1968. 44 p.

BARBOSA, G. V.; RODRIGUES, D. M. S. **Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Instituto de Geociências – IGC, 1967. 130 p.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Introdução à difração de raios-X em cristais (Apostila)**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2000. 19p.

BOUMANS, P.; R. KLOCKENKÄMPER (ed.) Total reflection X-ray fluorescence spectrometry. Proc. of the Second Workshop on TXRF, Dortmund, 26-27 May, 1988. **Spectrochim. Acta, 44B**: 433, 1989.

BOYD, R. N.; MORRISSON, R. D. **Química Orgânica**. 9a ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1990. 1510 p.

BRANDÃO, P. R. G. **Notas de aula, disciplina “Métodos de instrumentação e análise”**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – (PPGEM), Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia, 2013.

BRANDÃO, P. R. G. **Notas de aula, disciplina “Agregação e Dispersão”**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – (PPGEM), Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia, 2012.

BUENO, C. M. **Quartzito de Mário Campos (Relatório Interno)**. Belo Horizonte: ERG Mineração, 2013. 8p.

BULATOVIC, S. M. **Handbook of Flotation Reagents. Chemistry, theory and practice: flotation of sulfide ores.** Oxford: Elsevier Science & Technology Books, University of Oxford, 2007. Vol. 1. 458 p.

CARNEIRO M. A. **O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional - Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano.** 1992. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 233 p.

CASTRO, A. O. S. **Seleção de Poços de Petróleo para Operação de Fraturamento Hidráulico: uma Abordagem Comparativa entre Sistemas Fuzzy-genético e Neuro-Fuzzy.** 2004. 172p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). COPPE UFRJ, Rio de Janeiro.

CASTRO, E. F. **Produção de Pellet Feed a Partir de Lamas.** 2012. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

COELHO, J. M. **Relatório Técnico 44 – Areia Industrial – Projeto ESTAL.** Belo Horizonte: J. Mendo Consultoria, Outubro. 2010. 52 p.

CPRM. **Excursão virtual pela Estrada Real no Quadrilátero Ferrífero.** Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/estrada\\_real/geologia\\_estratigrafia.html](http://www.cprm.gov.br/estrada_real/geologia_estratigrafia.html). Acesso em: 05 nov. 2013.

CRUZ, T. T. **Caracterização de depósitos de areia da bacia sedimentar de Taubaté para a fabricação de vidros.** 2011. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da USP, São Paulo.

DORR II, J. V. N.; GAIR, J. E.; POMERENE, J. B.; RYNEARSON, G. A. **Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero.** BARBOSA, A. L. M. (Trad.). (Avulso 81). Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, 1957. 33 p.

DORR, J. V. N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil**. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 641-A:1-1969. 115 p.

DOSSIN, I. A.; CHAVES, M. L. de S. C.; UHLEIN, A.; ALVARENGA, C. J. de S. Geologia e depósitos diamantíferos da região de Sopa, Diamantina – MG. *In*: III Simp. Geol. Minas Gerais. Belo Horizonte, SGB, *Anais*, 1985. Bol. 5, p. 276-290.

DOWDESWELL, J.A. Scanning electron micrographs of quartz sand grains from cold environments examined using Fourier shape analysis. **Journal of Sedimentary Petrology**, Charlottesville, vol. 52, n. 4, p. 1315-1323, Dec. 1982.

GAN, W.; CROZIER, B.; LIU, Q. Effect of citric acid on inhibiting hexadecane–quartz coagulation in aqueous solutions containing  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  ions. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, n. 92, p. 84 – 91, Mar. 2009.

GANDINI, A. L. **Mineralogia, inclusões fluidas e aspectos genéticos do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais**. 1994. 212p. Dissertação de Mestrado, São Paulo, IG-USP.

GEOLOGY.COM. **Quartz**; Mineral Uses & Properties. Disponível em: <http://geology.com/minerals/quartz.shtml>. Acesso em: 03 nov. 2011.

GLOBAL SOURCES. **Refined Quartz Sands Manufacturer**. Disponível em: <http://www.globalsources.com/gsol/I/Refined-Quartz-Sand/p/sm/1015157007.htm>. Acesso em: 03 nov. 2011.

GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURY, D. E.; ECHLIN, P.; JOY, D. C.; ROMIG JR, A. D.; LYMAN, C. E.; FIORI, C.; LIFSHIN, E. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. 2a ed. New York: Plenum Press, 1992. 820 p.

GORCEIX, H. La explorations de or dans la province de Minas Gerais, Brésil. **SOC. GEOL. BULL**, Paris, v. 12., n. 6, 1884.

GRANULOMETRIA. In: Dicionário Livre de Geociências. 10 set. 2008. Disponível em: <http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Granulometria>. Acesso em: 03 nov. 2011.

GREEN, R. E.; COLOMBO, A. F. **Dispersion-selective flocculation-desliming characteristics of oxidized taconites (Report os Investigations 8867)**. Bureau of Mines, U. S. Department of the Interior, 1984. 19p.

HARBEN, P. W.; KUZVART, M. Silica. Industrial Minerals – A Global Geology. **Industrial Minerals Information Ltd, Metal Bulletin**, London, p. 352-364, 1996.

HERMANN, H. **Política de aproveitamento de areia no Estado de São Paulo: dos conflitos existentes às compatibilizações possíveis**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1992. 186 p. (Série Estudos e Documentos; 18).

HERZ, N. **Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Washington, US Geol. Surv. 58p. (Prof. Pap. 641-B). 1970.

HIDBER, P. C.; GRAULE, T. J.; GAUCKLER, L. J. Citric Acid — A Dispersant for Aqueous Alumina Suspensions. **Journal of the American Ceramic Society**, Westerville, v. 79, n. 7, p. 1857 – 1867, Jul. 1996.

IAEA - Radioisotope X-ray fluorescence Spectro-metry. Viena, Internacional Atomic Energy Agency, Technical Reports series no.115, 1970, 102 pag.

JENNE, E. A. **Adsorption of Metals by Geomedia: Variables, Mechanisms, and Model Applications**. Londres: Academic Press, 1998. 583 p.

JONES, M. P. **Applied Mineralogy – A Quantitative Approach**. London: Graham & Trotman, 1987. 259p. ISBN 978-0860105114.

KLEIN, C.; HURLBUT JR. C. S. (Rev.) **Manual of Mineralogy after J. D. DANA**. 20a ed. New York: John Wiley & Sons, 1985. 602 p.

KNAUER, L. G. Evolução geológica do Pré-Cambriano da porção centro-leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada. 1990. 298 p. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, Departamento de Geociências, Campinas.

KOGEL, J. E.; TRIVEDI, N. C.; BARKER, J. M.; KRUKOWSKI, S. T. (Ed.). **Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets and Uses**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006. 1548p. ISBN-13: 978-0-87335-233-8.

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. **Silica sand proppants used in well stimulation**. *In*: Sixteenth Forum on Geology of Industrial Minerals. St. Louis, Missouri. 1963.

KUBICKI, J. D.; SCHROETER, L. M.; ITOH, M. J.; NGUYEN, B. N.; APITZ, S. E. Attenuated total reflectance Fourier-transform infrared spectroscopy of carboxylic acids adsorbed onto mineral surfaces. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, University Park, v. 63, n. 18, p. 2709–2725, 1999.

KULCSAR NETO, F.; GRONCHI, C. C.; SAAD, I. F. S. D.; CUNHA, I. A.; POSSEBON, J.; TEIXEIRA, M. M.; AMARAL, N. C. **Sílica: manual do trabalhador**. São Paulo: Fundacentro, 2010. 59 p. ISBN 978-85-98117-50-8.

LACOURT, F. Resumo da geologia da Folha de Ouro Preto. *In*: Anais da Escola de Minas de Ouro Preto. 27:1-48. Ouro Preto, 1936.

LADEIRA, E. A. **Metallogenesis of gold at the Morro Velho Mine and in the Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. 1980. 272 p. Unpubl. Ph.D. thesis, Univ. Western Ontario, London, Ontario/Canada.

LADEIRA, J.G.B. **Relatório Final de Pesquisa Mineral – Quartzito de Mário Campos**. Belo Horizonte: ERG Mineração, 1984. 322 p.

LADEIRA, J.G.B. **Relatório Final de Pesquisa Mineral – Projeto Juruena**. Belo Horizonte: ERG Mineração, 2007. 1254 p.

LAGE, E. A. **Separadores magnéticos: experiência em minério de ferro da Herculano Mineração**. 2011. 20 p. Trabalho de conclusão de curso (Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto.

LUZ, A. B.; LINS, F. F. (Ed). **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. 729 p. ISBN 85-7227-204-6.

MACHADO, N.; NOCE, C. M.; LADEIRA, E. A.; BELO DE OLIVEIRA, O. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. **Geol. Society of America Bull.**, Boulder, v. 104, n. 9, p. 1221-1227, Sept. 1992. ISSN 0016-7606.

MACHADO, N.; CARNEIRO, M. A. U-Pb evidence of late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. **Canadian Journal of Earth Sciences**, Ottawa, v. 29, n. 11, p. 2341-2346, Nov. 1992.

MARIOTTO, C. L. Caracterização de algumas areias silicosas para emprego em moldagem. *In*: XXXVI Congresso Anual da ABM, 1981, Recife. *Anais*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1981. p.321-337, v. 4.

MARTINS, J. C.; MARTINS, E. S.; REATTO, A. **Revisão de intemperismo de micas**. Documentos n. 123. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 48p. ISSN 1517-5111.

MAXWELL, C. H. The Batatal Formation. **Bol. Soc. Bras. Geoc.**, São Paulo, v. 7, p. 60-61, 1958.

MILLS, H. J. Glass Raw Materials. In: LEFOND, S. J. (Ed.). **Industrial Minerals and Rocks**. New York: AIME, 1983. Volume 1, páginas 1167-1186, 5ª edição.

NEVES, M. R. **A relação entre mercado produtor e consumidor de bens minerais. Estudo de caso: a indústria vidreira do Estado de São Paulo**. 1990. 162 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências da UNICAMP, Campinas.

PAISANI, J. C. Análise morfométrica e de textura superficial de grãos utilizada na identificação de litofácies eólica e de dissipação em rampa arenosa/dissipação: o caso da Praia Mole (Ilha de Santa Catarina). **Geosul**, Florianópolis, v. 20, n. 39, p.105-118, Jan./Jun. 2005.

RAMACHANDRAN, R.; SOMASUDARAN, P. Effect of Temperature on the Interfacial Properties of Silicates. **Colloids and Surfaces**, Amsterdam, v. 21, p. 355 – 369, Jul. 1986.

RAPOSO, F. O. **Formações Ferríferas e Metassedimentos Químicos de Áreas Selecionadas do Quadrilátero Ferrífero e Suas Relações com Níveis Rudáceos**. 1996. 135 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Instituto de Geociências da UFMG, Belo Horizonte.

RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.1, n. 2, p. 1-11, 1994.

ROSIÉRE, C. A.; CHEMALE JR, F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p. 27-43, 2000.

RUBIO, J. C. C.; NOGUEIRA, W. A. **Práticas de Areia – Laboratório de Fundição – Processos Primários de Fabricação (Apostila Aulas Práticas)**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG (Departamento de Engenharia Mecânica), 2000. 34 p.

RUIZ, M. S.; NEVES, M. R. (Coord.). **Mercado produtor mineral do Estado de São Paulo: levantamento e análise**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1990. 185 p. p. 1-22, 33-84.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. **Tratamento de Minérios**. 4a. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 867 p.

SCALF, J.; WEST, P. **Introduction to Nanoparticle Characterization with AFM**: catálogo. Pacific Nanotechnology, Inc., 2006. 9p.

SCHOBENHAUS, C. (Coord.). **Principais Depósitos Minerais do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1997. 634p. p. 315 – 329 (Volume IV, Parte C: Rochas e Minerais Industriais).

SERRA, J. **Image analysis and mathematical morphology**. London: Academic Press, 1982. 610p. ISBN 978-0126372427.

SHAW, P. J. **Introduction to colloid and surface chemistry**. 4a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992. 306 p.

SILVA, J. P. P. **Mecanismo de ação do silicato de sódio como depressor em flotação**. 2011. 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, Recife.

SOARES, V. F. **Dispersão e estabilização de partículas submicrométricas de óxido de alumínio em sistemas líquidos destinados à produção de materiais refratários**. 2009. 117 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOLVATION. In: [IUPAC Compendium of Chemical Terminology](#) (Online ed.). [doi:10.1351/goldbook.S05747](https://doi.org/10.1351/goldbook.S05747). ISBN 0-9678550-9-8. NIC, M.; JIRAT, J.; KOSATA, B., eds. (2006–).

SVOBODA, J. The effect of magnetic field strength on the efficiency of magnetic separation. **Minerals Engineering**, London, v. 7, n. 5/6, p. 747-757. 1994.

TOTOU, A. R.; PEREIRA, C. A.; MACHADO, P. G. F.; BALTAR, C. A. M. Efeito da dispersão em polpa de minérios itabiríticos. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, n. 64, p. 227 – 332, Abril/Junho 2011.

TRADEKEY. **Silica Sand Manufacturer**. Disponível em: <http://www.tradekey.com/ks-quartz-sands/>. Acesso em: 03 nov. 2011.

UHLEIN, A.; OLIVEIRA, H. A. História Geológica do Quadrilátero Ferrífero. **Revista Ciência Hoje**, São Paulo, v. 27, n. 160, p. 68-71, Mai. 2000.

VAN GRIEKEN, R. E.; MARKOWICZ, A. A. **Handbook of X-Ray Spectrometry**. 2<sup>a</sup> Ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. 983 p.

WALLACE, R.M. The Moeda Formation. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, São Paulo, v.7, n. 2, p. 59-60, 1958.

WANG Y. YU F. Effects of Metallic Ions on the Flotation of Spodumene and Beryl. **Journal of China University of Mining & Technology**, Beijing, v. 17, n. 1, Mar. 2007.

WENTWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of Geology**, Chicago, v. 30, n. 5, Jul./Aug. 1922.

WIKIPEDIA. **Quartzito**. Disponível em: <http://geology.com/minerals/quartz.shtml>. Acesso em: 17 abr. 2014.

ZDUNCZYK, M. The facts of frac. **Industrial Minerals Magazine**, London, p. 58 – 61, Jan. 2007.

ZDUNCZYK, M. J.; LINKOUS, M. A. Industrial sand and sandstone. In: CARR, D. D. (editor). **Industrial Minerals and Rocks**. 6<sup>a</sup> ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1994. P. 879 – 891.