

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando  
aproveitamento como matéria-prima na siderurgia

Autor: Júlio César Versiani Costa

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Abril / 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

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

Júlio César Versiani Costa

CARACTERIZAÇÃO DO ITABIRITO DOLOMÍTICO DA MINA DE  
CONCEIÇÃO, VISANDO APROVEITAMENTO COMO MATÉRIA-PRIMA NA  
SIDERURGIA

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. Paulo Roberto Gomes Brandão

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2013

## DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa à minha esposa Rosana e aos colegas de trabalho da Vale S.A..

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente colaboraram na preparação deste trabalho e, em especial:

Ao professor Paulo Roberto Gomes Brandão, pela orientação, confiança e pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao professor Antônio Eduardo Clark Peres, pela amizade e acolhida no ingresso no PPGEM.

Aos amigos e espelhos profissionais, Engenheiro Joaquim Toledo pela ideia sobre o tema e Engenheiros Geólogos Adriana Zapparoli, Diego Mayrinck e Igor Cicolani, pelas informações e incentivo à participação no Grupo de Geometalurgia.

Aos Engenheiros Flávio Dutra, Delciane Porfiro e Marcelo Calixto, pela confiança e defesa deste trabalho dentro da Vale S.A.

À Engenheira Maria Beatriz Vieira, pelo apoio, execução dos testes e aporte de conhecimento.

À equipe do Laboratório de Caracterização Mineralógica, em especial a Waldirene Resende e Márcia Blandina.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1	Minérios de Ferro.....	4
3.2	Mineração no Quadrilátero Ferrífero .....	8
3.3	Siderurgia no Brasil .....	8
3.3.1	Matérias-Primas, Fundentes e Aglomerados na Siderurgia .....	9
3.4	Minério de Ferro na Vale.....	16
3.4.1	Classificação dos litotipos na Mina de Conceição.....	17
3.4.2	Critérios de Classificação .....	19
3.4.3	- Tabelas de recursos .....	21
3.4.4	Microscopia Óptica .....	25
3.4.5	Difração de Raios-X.....	26
3.4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura .....	27
3.5	Mineralogia das Amostras.....	28
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
4.1	Amostras de minérios .....	38
4.2	Preparação da Amostra .....	39
4.3	Caracterização.....	41
4.4	Ensaio físicos e metalúrgicos.....	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>42</b>

<b>5.1</b>	<b>Dados granuloquímicos .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2</b>	<b>Avaliação do Granulado .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3</b>	<b>Ensaio de Tamboramento .....</b>	<b>49</b>
<b>5.4</b>	<b>Ensaio de Crepitação .....</b>	<b>51</b>
<b>5.5</b>	<b>Ensaio de Degradação sob Redução Estática (RDI).....</b>	<b>53</b>
<b>5.6</b>	<b>Avaliação dos Finos (fração -8,00mm) .....</b>	<b>54</b>
<b>5.7</b>	<b>Análises mineralógicas .....</b>	<b>54</b>
5.7.1	Microscópio Eletrônico de Varredura.....	54
5.7.2	Microscopia Óptica.....	65
5.7.3	Difratometria de raios-X .....	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>RELEVÂNCIA.....</b>	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>74</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR .....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS:

Figura 1.1 - Mapa geológico simplificado do Distrito Ferrífero de Itabira (Galbiatti, 1999).....	2
Figura 3.1 - Mapa de Localização e vias de acesso para Itabira. ....	5
Figura 4.1 - Afloramento de Itabirito dolomítico.....	38
Figura 4.2 - Fluxograma da amostragem. ....	40
Figura 4.3 - Amostra: -31,00mm + 8,00mm (Granulado). ....	40
Figura 4.4 - Amostra: - 8,00mm (SF- Sinter Feed / PF- Pellet Feed). ....	41
Figura 5.1 - Teste de Tamboramento.....	50
Figura 5.2 - Teste de Crepitação.....	52
Figura 5.3 - Ensaio de RDI.....	53
Figura 5.4 - Imagem geral – fração -0,500+0,250mm (100x).....	57
Figura 5.5 - Imagem com apatita – fração -0,500 +0,250mm (250x). ....	57
Figura 5.6 - Imagem geral – fração -0,250 +0,150mm (200x).....	58
Figura 5.7 - Imagem geral – fração -0,250 +0,150mm (400x).....	58
Figura 5.8 - Imagem com caulinita – fração -0,250 +0,150mm (1700x) ....	59
Figura 5.9 - Imagem com talco – fração -0,250 +0,150mm (3500x). ....	59
Figura 5.10 - Imagem geral – fração -0,150 +0,075mm (600x).....	60
Figura 5.11 - Imagem com magnesita – fração -0,150 +0,075mm (2000x).....	60
Figura 5.12 - Imagem geral – fração -0,150 +0,075mm (950x).....	61
Figura 5.13 - Imagem com calcita – fração -0,150+0,075mm (2000x).....	61
Figura 5.14 - Imagem com gipsita – fração -0,150 +0,075mm (3500x).....	62
Figura 5.15 - Imagem com clorita – fração -0,150 +0,075mm (1850x).....	62
Figura 5.16 - Imagem com talco – fração -0,150 +0,075mm (1500x). ....	63

Figura 5.17 - Imagem geral – fração -0,075 +0,062mm (600x).....	63
Figura 5.18 - Imagem com ankerita, dolomita e clorita – fração -0,075 +0,062mm (1500x).....	64
Figura 5.19 - Imagem geral – fração -0,062 +0,045mm (600x).....	64
Figura 5.20 - Imagem geral – fração -0,062 +0,045mm (1000x).....	65
Figura 5.21 - Mosaico 1 – 20x.....	70
Figura 5.22 - Mosaico 2 – 20x.....	70



## LISTA DE TABELAS:

Tabela 3.1 - Estratigrafia da região do Distrito Ferrífero de Itabira (Hasui & Magalhães, 1998). .....	7
Tabela 3.2 - Teores de corte dos tipos de minério na Mina de Conceição. ....	20
Tabela 3.3 - Recurso total de minério de ferro. ....	21
Tabela 3.4 - Recurso medido de minério de ferro. ....	22
Tabela 3.5 - Recurso indicado de minério de ferro. ....	22
Tabela 3.6 - Recurso medido+indicado de minério de ferro. ....	23
Tabela 3.7 - Recurso inferido de minério de ferro. ....	23
Tabela 3.8 - Técnicas de mineralogia utilizadas na caracterização de minérios. ....	24
Tabela 5.1 - Análises químicas em amostra de grande volume (10t). ....	42
Tabela 5.2 - Análises granulométricas em amostra de grande volume (10t). .	44
Tabela 5.3 - Análise granuloquímica da fração granulado (-32,00+8,00mm)...	45
Tabela 5.4 - Análise granuloquímica da fração sinter / pellet (-8,00mm). ....	46
Tabela 5.5 - Qualidade Química. ....	47
Tabela 5.6 - Análise de Porosidade da amostra. ....	47
Tabela 5.7 - Resultado do Teste de Tamboramento.....	50
Tabela 5.8 - Resultado do Teste de Crepitação.....	52
Tabela 5.9 - Resultado do Ensaio RDI.....	54
Tabela 5.10 - Análises granuloquímicas da fração -8,0mm. ....	54
Tabela 5.11 - Composição qualitativa da amostra. ....	56
Tabela 5.12 - Quadro ilustrativo dos principais tipos mineralógicos e morfológicos de óxidos/ hidróxidos de ferro. ....	66
Tabela 5.13 - Mineralogia com % estimada em massa.....	67

Tabela 5.14 - Tipos morfológicos dos grãos de óxidos/ hidróxidos de ferro (em %)	68
Tabela 5.15 - Granulação dos grãos de óxidos/ hidróxidos de ferro (em %).	69
Tabela 5.16 - Mineralogia qualitativa das amostras de itabirito dolomítico e itabirito dolomítico repetição	71

## RESUMO

A caracterização mineral e tecnológica é uma das ferramentas mais importantes no aproveitamento de um recurso mineral de forma estruturada e otimizada, sendo recomendada desde a fase de exploração até a fase de exploração. Na mina de Conceição, localizada em Itabira, MG, e pertencente à Vale S.A., as formações ferríferas dolomíticas são tratadas como estéreis e são depositadas em pilhas permanentes previamente definidas devido à incapacidade de processamento e comercialização deste litotipo, ocasionado principalmente pelos elevados teores de CaO e MgO, além de P e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

O presente trabalho contribui para o desenvolvimento de uma alternativa de uso dos minérios dolomíticos ferríferos como fundentes na carga de alto-forno ou na composição de pelotas e/ou sinter feed. Foram coletadas amostras, e realizadas análises granuloquímicas, mineralógicas e microestruturais. Os principais minerais identificados na amostra global foram hematita (abundante), dolomita (medianamente abundante), ankerita, magnesita e talco (baixos), lizardita e quartzo (traços). Testes de caracterização tecnológicos demonstraram a viabilidade de uso na fração granulado (-32,00 +8,00mm) que apresenta boa qualidade química, com baixos teores de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, excelente resistência ao tamboramento e baixos níveis de crepitação.

## **ABSTRACT**

The mineral and technological characterization is one of the most important tools in the definition for using a mineral resource in a structured and optimized way, being recommended from initial exploration to extraction stages. In the Conceição mine, located in Itabira, MG State, Brazil, and owned by Vale S.A., the dolomitic iron formations are treated as waste and are deposited in predefined permanent stock piles due to inability for processing and marketing this rock type, caused mainly by high CaO, MgO, P and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents.

This work contributes to the development of an alternative use for the ferriferous dolomite ores as a flux in blast furnace burden or in the composition of pellets and/or sinter feed. Samples were collected and analyzed for particle size, chemical, mineralogical and microstructural properties. The major minerals identified in the global sample were hematite (abundant), dolomite (medium abundant), ankerite, magnesite and talc (low occurrence), lizardite and quartz (traces). Technological characterization tests demonstrated the feasibility of using the lump fraction (-32.00 +8.00mm) which exhibits good chemical quality, with low contents of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and excellent values of tumbler and crepitation indices.

## 1 INTRODUÇÃO

Há quase trezentos anos o Quadrilátero Ferrífero da região central de Minas Gerais vem sendo intensamente explorado por conter diversos tipos de minerais e rochas. No decorrer do século XX e início de século XXI, o minério de ferro se transformou num dos pilares da economia mineral, além de tornar-se um item importante na pauta de exportação do país.

A expressão Quadrilátero Ferrífero foi cunhada pela primeira vez no Congresso Internacional de Geologia de 1910, em Estocolmo, por Orville Derby. A expressão descreve alinhamentos de serras na região central de Minas Gerais, condicionadas pela presença de uma importante formação ferrífera.

O nome formação ferrífera é uma designação própria para um corpo de rochas metamórficas mapeável. No Quadrilátero Ferrífero, estima-se que a formação ferrífera original teria atingido dimensões originais da ordem de 100km.

Dois tipos básicos de minérios são lavrados atualmente nas minas do Quadrilátero: minérios de alto teor ou hematitas, e minérios quartzosos ou itabiríticos. O minério de alto teor é denominado pelo mineral que o constitui, hematita, sendo reconhecido pela ausência generalizada de quartzo visível a olho nu e teores superiores a 64,0% de Fe. Os minérios hematíticos são produtos de metamorfismo da rocha de itabirito. O metamorfismo pode localmente solubilizar e remover o quartzo, produzindo corpos de hematita pura.

Segundo Chemale Jr. & Quade (1987), o minério quartzoso ou itabirito é um produto de alteração, por intemperismo, da rocha de mesmo nome. O intemperismo é um processo que atua tanto mais intensamente, quanto mais próximo à superfície topográfica. Produz não só a liberação dos grãos ou agregados de hematita existentes na rocha, como também o aumento dos teores de Fe, visto que é um processo de solubilização preferencial do quartzo. Ao contrário do que ocorre com minérios de alto teor (hematita), o run-of-mine dos itabiritos não produz massas significativas acima de 8,0mm.

De acordo com Guimarães (2007), na mina de Conceição, localizada em Itabira e pertencente à Vale S.A., as formações ferríferas dolomíticas são tratadas como estéreis e são depositadas em pilhas permanentes, previamente definidas e não compõem a reserva lavrável de minérios ferríferos.

As hematitas e itabiritos dolomíticos são descartados devido à incapacidade de processamento e comercialização deste litotipo, ocasionado principalmente pelos elevados teores de CaO e MgO, além de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e P.

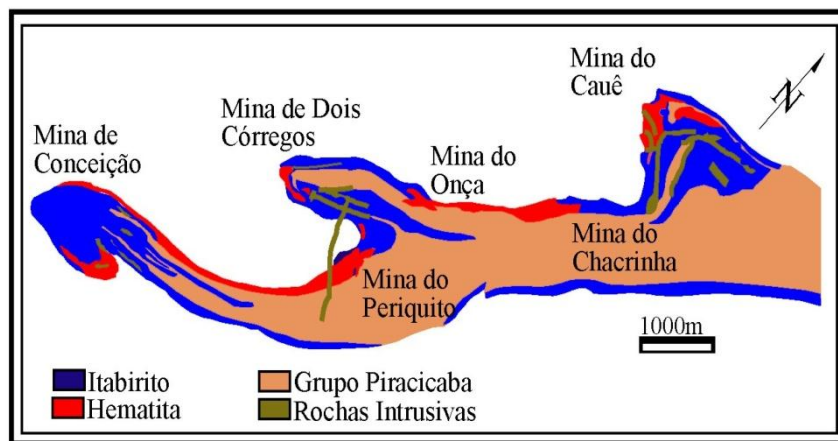


Figura 1.1 - Mapa geológico simplificado do Distrito Ferrífero de Itabira (Galbiatti, 1999).

## 2 OBJETIVOS

Existem aplicações potenciais para um material como o itabirito-hematita-dolomítico, não só na siderurgia, mas também em plantas de pelotização da Vale, desde que o produto gerado apresente bom desempenho nos processos de aglomeração, baixos teores de P e  $Al_2O_3$ , baixa variabilidade química e uma produção estável no longo prazo, podendo inclusive vir a substituir calcários dolomíticos. Os produtos testados e gerados, a partir dos itabiritos dolomíticos, podem ser granulados (-40,00mm +8,00mm), finos (-6,35mm + 0,15 mm) ou superfinos (-0,15mm), dependendo do uso proposto.

Os principais objetivos desta pesquisa são:

- Caracterização química e granulométrica dos minérios dolomíticos;
- Caracterização mineralógica, utilizando-se microscopia eletrônica de varredura e microanálise (MEV-EDS) complementada com a utilização de microscopia óptica e difração de raios-X;
- Definição da viabilidade do uso de itabiritos dolomíticos na siderurgia, com a realização de ensaios tecnológicos específicos, com o esperado aproveitamento deste material, considerado atualmente como estéril.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

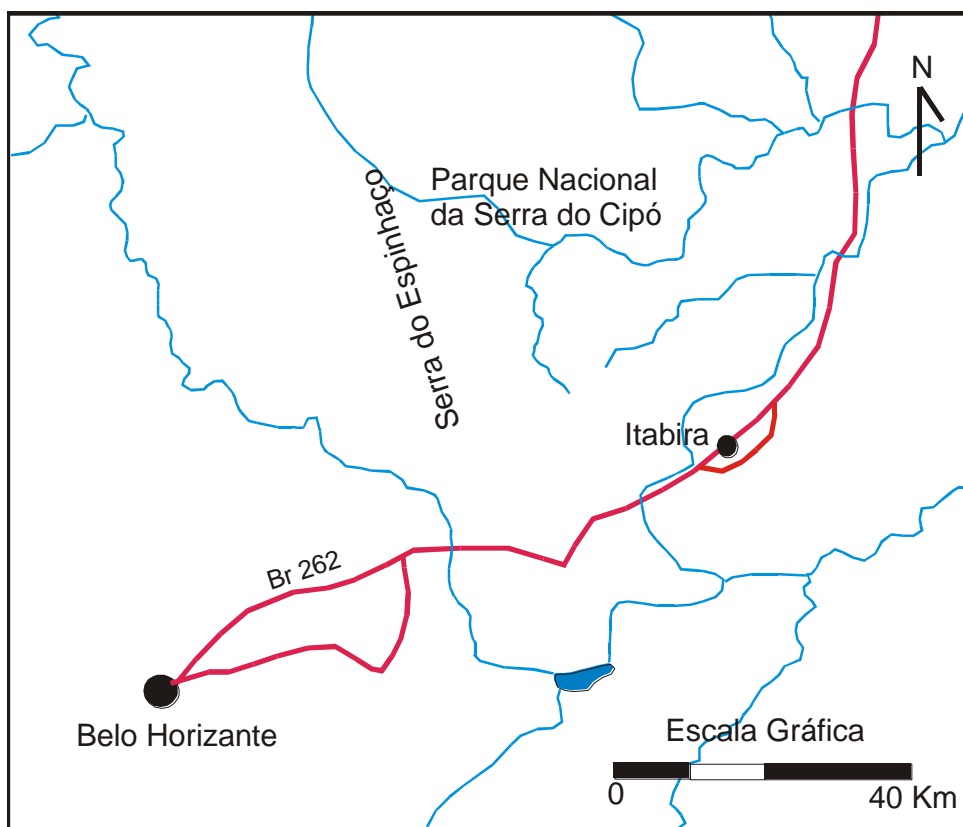
#### **3.1 Minérios de Ferro**

A formação ferrífera mencionada por Derby (1906) é constituída por um único tipo de rocha, denominada itabirito, composta por alternância de níveis finos de quartzo e hematita. Os grãos de hematita e quartzo que o compõem mostram sinais de serem produtos de crescimento ou cominuição de grãos pré-existentes, ou, também, produto de mudanças de fases minerais; os níveis de quartzo e hematita, originalmente horizontais, mostram-se deformados. Essas modificações metamórficas e deformacionais não ocorrem homoganeamente. Observações das rochas do Quadrilátero Ferrífero mostram que elas sofreram modificações metamórficas indicativas de aquecimento e compressão, a temperaturas e pressões da ordem de 300°C e 500atm. Verifica-se ainda que estes efeitos crescem de oeste para leste.

Com cerca de 88km<sup>2</sup> de área, o Complexo Ferrífero de Itabira localiza-se no município homônimo a aproximadamente 90km a nordeste da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais (Figura 3-1).

O Quadrilátero Ferrífero encontra-se inserido no extremo sul do Cráton São Francisco (Almeida, 1977). A estratigrafia deste segmento crustal engloba três unidades principais: os terrenos gnáissicos-migmatíticos arqueanos (Hertz, 1970; Carneiro, 1992; Noce, 1995), uma sequência vulcanossedimentar do tipo greenstone belt (Supergrupo Rio das Velhas), também arqueana (Dorr II, 1969) e seqüências metassedimentares supracrustais de idade paleoproterozóica (Supergrupo Minas e Grupo Itacolomy) (Dorr II, 1969; Babinski et al., 1969).





**Figura 3.1 - Mapa de Localização e vias de acesso para Itabira.**

As grandes reservas de ferro do Quadrilátero Ferrífero, Centro-Sul de Minas Gerais, estão encaixadas na Formação Cauê do Grupo Itabira, Supergrupo Minas do Proterozóico Inferior. Embora Dorr (1969) tenha subdividido o Grupo Itabira em uma unidade inferior, a Formação Cauê onde predominam itabiritos e uma superior, a Formação Gandarela com rochas carbonáticas (dolomitos e mármore dolomíticos e calcíticos), filitos e formações ferríferas bandadas, não existe uma separação nítida entre elas. Ao invés disto, dolomitos e itabiritos ocorrem intercalados, tanto vertical como lateralmente (Pires 1995), e o contato entre as litologias é freqüentemente brusco. Na formação Cauê, ocorrem as formações ferríferas mais espessas do Supergrupo Minas (200-300m), representada por itabiritos e subordinadamente por itabiritos dolomíticos e anfíbolíticos com pequenas lentes de filitos e alguns horizontes manganésíferos.

No Grupo Itabira, as formações ferríferas estão hoje transformadas em itabiritos e hematitas compactas, altamente deformadas e composicionalmente modificadas pelos processos tectônicos e metamórficos. Pequenos núcleos preservados de magnetita no interior dos cristais de hematita sugerem que a maior parte dessas rochas era originalmente formações ferríferas fácies óxido, subfácies magnetita, posteriormente oxidadas por soluções hidrotermais durante os processos de deformação. Nos itabiritos do Proterozóico Inferior, além do quartzo, o mineral mais comum é a hematita (muitas vezes com núcleos alterados de magnetita) e, localmente, a dolomita pura. A dolomita ferrosa e a ankerita podem ocorrer na base da Formação Cauê, associadas a níveis de chert carbonático e filito dolomítico. Quanto aos óxidos de elementos maiores, os itabiritos de Proterozóico Inferior se distinguem principalmente pelos elevados teores de  $Fe_2O_3$ .

Os itabiritos dolomíticos são constituídos geralmente por bandas de dolomita ferrosa, quartzo, óxidos de ferro, podendo apresentar calcita, clorita e anfibólios. Este tipo grada para dolomitos ferruginosos com bandas claras de carbonato e escuras de óxidos de ferro que devem ser igualmente consideradas como formações ferríferas dolomíticas. Apresentam como componentes mineralógicos principais: martita, hematitas, kenomagnetita, dolomita ferroana; e como componentes acessórios: calcita, grunerita, cummingtonita, clorita, stilpnomelana, biotita, tremolita, actinolita, quartzo (chert), sulfetos e pirofilita (Pires, 1995).

A tabela 3.1 mostra a estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero e detalha os litotipos presentes em cada um dos grupos e formações.

**Tabela 3.1 - Estratigrafia da região do Distrito Ferrífero de Itabira (Hasui & Magalhães, 1998).**

Idade	Supergrupo	Grupo	Formação	Litotipos
Fanerozóico	Coberturas cenozóicas			Depósitos de fluxos de detritos e tálus
	Rochas máficas intrusivas			Clorita-actinolita xistos
Paleoproterozóico	Minas	Piracicaba	Indiviso	Quartzitos ferruginosos, quartzo-sericita xistos
		Itabira	Gandarela	Dolomitos ferro-manganesíferos, xistos carbonáticos
			Cauê	Itabiritos e hematitas
		Caraça	Indiviso	Quartzitos sericíticos, sericita-xistos
Arqueano	Sequência Serra da Pedra Branca	Indiviso	Indiviso	Pacote vulcano-sedimentar máfico-quartzítico
	Rio das Velhas	Nova Lima	Indiviso	Xistos de origem metassedimentar ou meta-vulcânica/vulcanoclástica
	Granitóide Borrachudos	Indiviso	Indiviso	Rocha gnáissica de matriz quartzo-feldspática com biotita
	Embasamento	Indiviso	Indiviso	Complexo granito-gnáissico

### **3.2 Mineração no Quadrilátero Ferrífero**

A exploração de ouro em Minas Gerais marcou definitivamente a história do país e do mundo, ao dominar a produção global durante todo o século XVIII. Das pouco mais de 1400 toneladas produzidas neste período, a Capitania de Minas Gerais contribuiu com nada menos que 700 toneladas que representavam 50% da produção mundial no período. Essa situação perdurou até o início do século XIX, quando o ouro passou a ocupar um plano secundário na economia nacional (Souza et al., 2007).

O Quadrilátero Ferrífero continua sendo a região de maior concentração urbana de Minas Gerais, além de ser uma área de fundamental importância para o desenvolvimento econômico estadual, impulsionando, inclusive, o setor industrial, sobretudo o segmento siderúrgico. Destaca-se no cenário nacional pela grande riqueza mineral. Entre os vários minérios extraídos do Quadrilátero Ferrífero estão o ouro, o manganês e o ferro. (Suzaki, 2009).

Do ponto de vista econômico, o Estado de Minas Gerais tem na mineração uma de suas principais atividades industriais. A produção mundial de minério de ferro em 2011 foi de cerca de 2,8 bilhões de toneladas. A produção brasileira representou 14,2% da produção mundial, sendo Minas Gerais (69,1%) e Pará (27,7%) os principais Estados produtores. (Jesus, 2012).

### **3.3 Siderurgia no Brasil**

Segundo Vieira et al. (2012), o parque siderúrgico nacional iniciou a década de 90 contando com 43 empresas estatais e privadas, cinco delas integradas a coque, 9 a carvão vegetal, 2 integradas a redução direta e 27 semi-integradas, além de produtores independentes de ferro-gusa e carvão vegetal, que somavam cerca de 120 altos-fornos. A instalação dessas unidades produtoras se concentrou principalmente no Estado de Minas Gerais e no eixo Rio-São Paulo, devido à proximidade de regiões ricas em matérias-primas empregadas

na fabricação do aço, ou de locais com grande potencial de consumo. Hoje, o parque produtor de aço brasileiro, um dos mais modernos do mundo, é constituído de 25 usinas, sendo 11 integradas (produção a partir de minério de ferro) e 14 semi-integradas (produção a partir da reciclagem de sucata), administradas por sete grupos empresariais.

Nos primeiros anos da década de 90, era visível o esgotamento do modelo com forte presença do Estado na economia. Em 1991, começou o processo de privatização das siderúrgicas. Dois anos depois, em 1993, oito empresas estatais, com capacidade para produzir 19,5 milhões de toneladas (70% da produção nacional), tinham sido privatizadas.

O Brasil tem hoje o maior parque industrial da América do Sul, é o maior produtor da América Latina e ocupa o quinto lugar como exportador líquido de aço e nono como produtor de aço no mundo. Grupos produtores do exterior estudam a possibilidade de investir na construção de novas usinas no Brasil, sobretudo no Norte e no Nordeste, voltadas para a exportação de produtos semiacabados.

O cenário para a siderurgia brasileira em 2013 deve continuar nebuloso e incerto. A avaliação é de Albano Chagas Vieira, presidente do conselho diretor do Instituto Aço Brasil (IABr). Para Vieira (2013), que também preside a Votorantim Siderurgia, o panorama global de negócios para o setor tende a se agravar no ano 2014 com o aumento da oferta excedente do produto.

### **3.3.1 Matérias-Primas, Fundentes e Aglomerados na Siderurgia**

Machado (2006) cita que resumidamente, nos altos-fornos, ocorrem fusão e redução do ferro, que passa da forma de óxido à forma metálica. Neste equipamento, toda a carga de óxido de ferro, agentes redutores e combustíveis é adicionada anteriormente ao acendimento do forno. No carregamento do forno faz-se uma pilha de material no interior do mesmo, chegando a alturas de 30 metros em alguns casos. Devido a essas características do processo, são necessárias ao material alimentado algumas propriedades específicas.

### *Minérios de ferro*

O ferro não é encontrado em estado puro na natureza, mas em combinações químicas de metais contidos nas rochas. Os minérios de ferro devem ser beneficiados para atender a especificação para a carga de um alto forno e podem ser divididos em: granulados (-40mm), sinter (-50mm +5,0mm) ou pelotas (-18mm +5mm).

Os minérios que apresentam interesse econômico para a siderurgia são basicamente os óxidos, sendo os mais utilizados hematita e magnetita.

Hematita - é o tipo mais comum de minério de ferro, constituído essencialmente pelo óxido com fórmula  $Fe_2O_3$  (trióxido). Apresenta um teor nominal de 69,5% de ferro contido, mas o teor varia de 45% a 68% devido a presença de ganga (impurezas).

Magnetita - Constituída essencialmente do óxido de ferro cuja fórmula é  $Fe_3O_4$  (peróxido). Apresentando um teor nominal de 72,4% de ferro, sendo que o seu teor real varia de 50% a 70%. É um material de cor cinza escuro e apresenta propriedades magnéticas, o que facilita a sua concentração nas operações de beneficiamento de minérios.

Secundariamente ou raramente também podem utilizados siderita e pirita.

### *Características dos Minérios de Ferro para Sinterização*

De acordo com Machado (2006), o minério de ferro para utilização na sinterização é comumente chamado de "Sinter Feed". Estes minérios são especificamente preparados para serem sinterizados devendo possuir portanto características físicas e químicas capazes de propiciar a obtenção de um aglomerado dentro das necessidades do alto-forno.

### *Características Físicas*

O minério de ferro para sinterização deve apresentar distribuição granulométrica adequada, poder de aglomeração a frio e secundariamente porosidade, forma de grão, crepitação, densidade.

Atualmente, considera-se que a melhor distribuição granulométrica esteja na faixa:

- 0% de fração > 10,0mm
- 45% a 60% da fração de 1 a 10,0mm
- e menor de 15% da fração < 0,074mm (200 mesh)

A produção de uma máquina de sinter está intimamente relacionada com o poder de aglomeração a frio dos minérios, uma vez que a o processo de sinterização consiste em misturar e homogeneizar finos de minério de ferro, finos de carvão ou coque, finos de fundentes e umidade e atear fogo ao carvão, de modo que a temperatura atinja 1200°C a 1400°C, condição esta suficiente para que a umidade evapore e as partículas se soldem por caldeamento, obtendo-se um material resistente e poroso, denominado sinter.

#### *Características Químicas*

A composição química que um minério de ferro deve apresentar para a sinterização depende de um contexto amplo, no qual envolve:

- Balanço de carga para o alto-forno (devido ao nível de participação do sinter na carga metálica do alto-forno).
- O tipo e o volume de escória de alto-forno.
- A qualidade do sinter esperado.

Normalmente no caso dos minérios brasileiros de elevado teor de ferro, enxofre, titânio e álcalis (compostos contendo potássio, sódio, etc.) o controle químico resume-se nos teores de sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e fósforo (P).

A sinterização exige portanto um minério que possua estas características dentro de determinados valores para que se produza o sinter. No entanto, além de satisfazer o aspecto da qualidade o minério deve apresentar disponibilidade de fornecimento e baixo custo. Sendo assim, surge uma mistura destes em que normalmente se encontra o minério base e o de adição. Entende-se por minério base o minério que devido as suas características físicas e químicas é usado em maior proporção. Por minério de adição entende-se como aquele que por possuir características físicas e/ou químicas especiais é usado em menor proporção, servindo como corretivo do minério base.

#### *Características dos Minérios de Ferro para Alto-Forno*

A carga metálica do alto-forno a coque é normalmente composta de:

- Sinter;
- Pelota;
- Minério granulado.

O minério de ferro normalmente participa numa proporção que pode variar de 5% até 20% dependendo muito da usina e da situação.

#### *Características Químicas*

- Alto teor de ferro
- Baixos teores de fósforo, álcalis e enxofre.

No caso do fósforo, cerca de 100% vai para o gusa, além disso, estima-se que para cada 0,1% de fósforo no gusa necessita-se de 1,0 kg de carbono/t gusa. Os álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) provocam formação de cascão no alto-forno. O enxofre e o fósforo elevados desclassificam o aço na aciaria devido ao fato de provocarem fragilidade no mesmo.



### *Características Físicas dos Minérios de Ferro para Alto-Forno*

Os parâmetros que devem ser controlados no minério são basicamente os seguintes:

- Granulometria (finos < 5,0mm)
- Crepitação/RDI/Redutibilidade
- Resistência mecânica
- Finos de aderência

Com exceção da resistência mecânica e da redutibilidade, os níveis de controle devem ser os mais baixos possíveis.

### *Fundentes*

Os fundentes são substâncias que auxiliam no processo de fusão dos metais e são largamente utilizados na separação do minério de ferro da ganga, auxiliando assim na formação da escória. O tipo de fundente usado reflete diretamente na alcalinidade da escória, e, portanto, na forma como esta irá reagir com as paredes refratárias do forno. A importância dos fundentes pode ser mostrada analisando a quantidade deste que é usado. Hoje em dia, para a produção de 1000 kg de gusa são utilizados aproximadamente 330 kg de material fundente (Susaki, 2009).

Os fundentes adicionados à carga do alto forno têm a função de proporcionar a formação de uma escória fundida numa estreita faixa de temperatura, de fácil escoamento na temperatura de fusão do gusa e que fique sobrenadando a este. A escória formada é um composto ternário formado por sílica, alumina e óxido de cálcio cuja função principal é remover os componentes não voláteis da carga do alto forno.

Segundo Machado (2006), as substâncias utilizadas com fundentes podem ser divididos em:

- Básicos (portadores de CaO e/ou MgO)
- Ácidos (portadores de SiO<sub>2</sub> e/ou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Os principais fundentes são:

- Calcário (portador de CaO);
- Dunito (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>);
- Serpentinó (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>);
- Dolomita (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>);
- Quartzo (portador de SiO<sub>2</sub>).

A composição química destes é a mesma tanto para sinterização quanto para o alto-forno, sendo que a granulometria situa-se na faixa:

- 0,0 a 3,0 mm aproximadamente para sinterização;
- 10,0 a 30,0 mm aproximadamente para o alto-forno.

## SELEÇÃO DOS FUNDENTES

A seleção e a proporção de material fundente são estabelecidas em função da composição do minério utilizado e das cinzas presentes no coque após a carbonização do carvão. Normalmente utiliza-se óxido de cálcio, óxido de magnésio e alumina. Alternativamente ao óxido de cálcio pode-se usar carbonato de cálcio, que se converte naquele durante o aquecimento dentro do alto forno, liberando dióxido de carbono. Na composição da escória também deve ser avaliado o grau de corrosividade desta aos refratários do alto-forno, escória com elevada alcalinidade (Machado 2006).

## INFLUÊNCIA DO FUNDENTE NA ESCÓRIA

A escória fundida é uma massa que por sua insolubilidade e menor densidade, ao final do processo de produção do gusa, que sobrenada no ferro gusa, e posteriormente é conduzida por canais até o lugar onde será resfriada. A composição química das escórias de alto-forno produzidas varia dentro de limites relativamente estreitos. Os elementos que participam são os óxidos de:

cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e magnésio (Mg). Têm-se ainda, em quantidades menores, FeO, MnO, TiO<sub>2</sub>, enxofre, etc. É importante ressaltar que essa composição vai depender das matérias-primas e do tipo de gusa fabricado. A composição química é de extrema importância e vai determinar as características físico-químicas das escórias de alto-forno.

Os óxidos usados como fundentes, são de extrema importância para os processos pirometalúrgicos (aqueles que ocorrem em altas temperaturas). O ferro não é encontrado em estado puro na natureza, mas em combinações químicas de metais contidos nas rochas. Essas combinações químicas ocorrem misturadas com as “gangas”, compostas de silício, alumínio, cal e magnésio. Os principais são: magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) com cerca de 60% de ferro; hematita vermelha (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com cerca de 65% de ferro; ferro oolítico, siderita (FeCO<sub>3</sub>) com alto teor de manganês; pirita FeS<sub>2</sub>. O fundente entra como agente no auxílio da remoção dessa ganga, formando assim a escória. Ao final do processo, tem-se um ferro, liberado de ganga.

*Sinterização*: processo que se realiza a altas temperaturas. Com o aquecimento, as partículas de minério de ferro derretem superficialmente, unem-se umas às outras e acabam formando um só bloco poroso. Enquanto ainda está quente, esse bloco é quebrado em pedaços menores chamados sínter. Com a sinterização, são obtidos blocos feitos com partículas de minério de ferro, carvão moído, calcário e água. Tudo é misturado até se obter um aglomerado. Essa mistura é colocada sobre uma grelha e levada a um equipamento que, com a queima de carvão, atinge uma temperatura entre 1.000°C e 1.300°C.

*Na pelotização*: por esse processo, o minério de ferro é moído bem fino e depois umedecido para formar um aglomerado. O aglomerado é, então, colocado em um tipo de moinho em forma de tambor. Conforme esse tambor gira, os aglomerados vão sendo unidos até se transformarem em pellets. Depois disso, essas pelotas são submetidas à secagem e queima para endurecimento.

### *Carvão Vegetal e Mineral*

Os combustíveis são importantes na fabricação do ferro-gusa. Devem ter alto poder calorífico para a geração do calor necessário e não podem contaminar o metal obtido. Dois tipos de combustíveis são usados: o carvão vegetal e o carvão mineral.

### 3.4 Minério de Ferro na Vale

De um simples parafuso às grandes construções, a transformação do minério de ferro está presente em nosso dia a dia. Mesmo eletrodomésticos revestidos com outros materiais fazem uso do ferro ou aço: liquidificador, máquina de lavar, fogão, geladeira, condicionador de ar, entre outros. (<http://www.vale.com/brasil>).

O minério de ferro é o destaque na linha de produtos da Vale. Sua qualidade superior é resultado de uma série de investimentos, tanto em pesquisa mineral como no uso de tecnologias de última geração para o processamento. Esses são alguns dos motivos que levam o produto a ser exportado para os quatro cantos do planeta.

A partir do minério de ferro e de seus concentrados, podem ser produzidos os seguintes produtos:

- Granulado: material grosseiro peneirado a partir do ROM britado e com tamanho máximo variável (-40mm +8,0mm);
- Sinter feed: para ser utilizado na siderurgia, o sinter feed é submetido a uma operação de aglomeração, na qual se forma o sinter, produto que alimenta o alto-forno. O sinter feed de Carajás é considerado referência mundial, com alto teor de ferro, baixos níveis de impurezas e boas propriedades metalúrgicas (-6,35mm +0,15mm);

- Pellet feed: material superfino com alto teor de ferro e baixos níveis de impurezas. Para ser utilizado no alto-forno, ele deve passar pela pelotização (-0,15mm);
- Pelotas: pequenos aglomerados de minério de ferro feitos a partir de uma tecnologia que permite utilizar os finos gerados durante a extração e processamento do minério, antes considerados resíduos do processo (+5,0mm -18mm).

#### Qualidade do minério de ferro

A qualidade do minério de ferro definida por Lima (2003), está basicamente ligada a três propriedades:

- Química: quanto maior o teor de ferro e menor o de impurezas, melhor;
- Física: refere-se ao tamanho e distribuição das partículas e metalurgia;
- Itens de desempenho: que afetam a produtividade durante o processo siderúrgico.

#### **3.4.1 Classificação dos litotipos na Mina de Conceição**

Guimarães et al. (2007), estudando as ocorrências de minérios dolomíticos na Mina de Conceição, dividiu-os em dois litotipos:

Hematita dolomítica (HDO): a hematita dolomítica possui teor de Fe superior a 60,0%, com teor médio de 64,08%. Apresenta percentual médio de material granulado maior que 8mm de 93,83%. Os teores de contaminantes têm valores médios de 0,92% para a perda ao fogo e valores médios de CaO de 0,50%, que pode chegar até 2,15%, além de possuírem teores médios de 2,09% de MgO, que chega ao máximo de 5,99%.

A hematita dolomítica ocorre em profundidade com intercalações de carbonatos (dolomita e magnesita) em meio ao minério de ferro. A coloração é marcada por tons rosados e avermelhados em contraste com a cor cinza do minério de ferro (figura 3.1). Ocorre na forma de lente espessa, podendo atingir até 30 metros de espessura inclusa no pacote de itabirito compacto na base da formação ferrífera. Sua origem deve estar relacionada a processos de enriquecimento de itabiritos dolomíticos.



Figura 3.1 - Hematita dolomítica.

Itabirito dolomítico (IDO): O litotipo é caracterizado por valores médios de CaO de 2,09%, mas com teores máximos de 16,98% e/ou teores médios de MgO de 3,41%, que atingem o valor máximo de 24,9%. Para a perda ao fogo o valor máximo pode chegar a 22,65%, mas possui média de 3,5%. A coloração é marcada por tons rosados e avermelhados em contraste com a cor cinza do minério de ferro (Figura 3.2). Sua diferenciação da hematita dolomítica é

baseada nos teores de ferro. Ocorre na forma de lente inclusa de até 80 metros no pacote de itabirito compacto na base da formação ferrífera junto às lentes de hematita dolomítica. Possui teores médios de 41,07% de Fe e percentual médio de material granulado maior que 8mm de 98,99%.

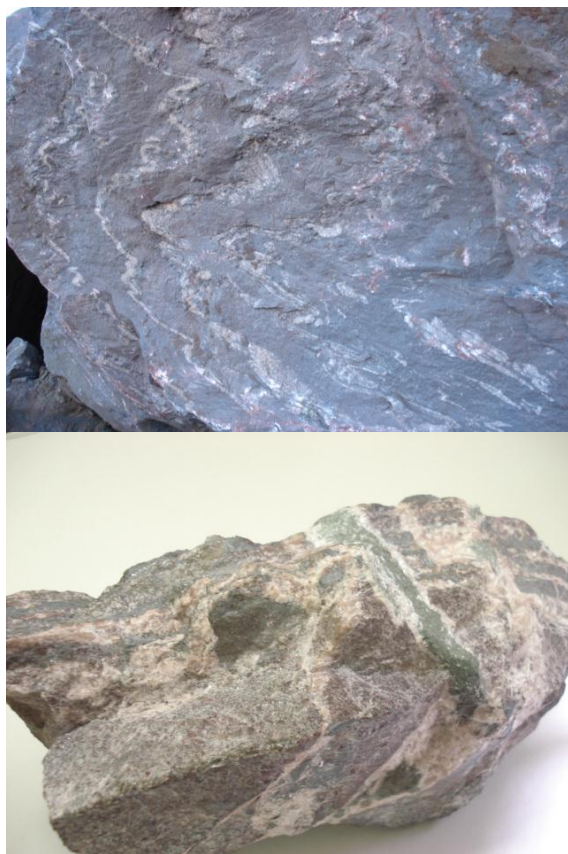


Figura 3.2 - Itabirito dolomítico.

### **3.4.2 Critérios de Classificação**

De acordo com Guimarães (2007), os litotipos modelados foram classificados a partir da descrição visual dos materiais na mina e/ou nos testemunhos de sondagem, gerando uma classificação visual, denominada CLV. Estes litotipos são classificados também de acordo com sua caracterização química e

granulométrica, como pode ser visto na Tabela 3.2, onde são apresentados os teores de corte utilizados.

A partir da compatibilização da classificação visual dos litotipos e das suas características químicas e granulométricas, baseadas no critério 1 e critério 2, os litotipos foram modelados e receberam a classificação interpretada, denominada CLI.

A CLI representa a classificação do litotipo conforme a interpretação do modelo geológico, considerando caracterização visual, química e granulometria do litotipo.

**Tabela 3.2 - Teores de corte dos tipos de minério na Mina de Conceição.**

<b>HEMATITA</b>		
SIGLA – Descrição	Critério 01	Critério 02
HC – Hematita compacta	$G1 \geq 70\%$	FeGL $\geq 63\%$
HF – Hematita friável	$G1 < 70\%$ e $G4 < 60\%$	
HP – Hematita pulverulenta	$G4 \geq 60\%$	
HMN – Hematita manganésifera	$MnGL \geq 0.5\%$	
HDO – Hematita dolomítica	CaGL $\geq 1\%$ ou MgGL $\geq 1\%$	FeGL $\geq 60\%$
<b>ITABIRITO</b>		
SIGLA – Descrição	Critério 01	Critério 02
IC – Itabirito compacto	$G1 \geq 80\%$	$25\% \leq FeGL < 63\%$
IF – Itabirito friável	$G1 < 30\%$	
IS – Itabirito semcompacto	$30\% \leq G1 < 80\%$	
IH – Itabirito hematítico	$G1 \geq 30\%$ e $FeG1 \geq 63\%$	$55\% \leq FeGL < 63\%$
IMN – Itabirito manganésífero	$MnGL \geq 0.5\%$	$25\% \leq FeGL < 63\%$
IDO – Itabirito dolomítico	CaGL $\geq 1\%$ ou MgGL $\geq 1\%$	FeGL $\leq 60\%$



Legenda: GL:Global,G1:fração +8,0mm,G2:fração -8,0+1,0mm,G3: fração-1,0+0,15mm,G4:-0,15mm.

### 3.4.3 - Tabelas de recursos

As tabelas 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7, avaliadas por Guimarães (2007), apresentam os cálculos de massa e teores por tipo de recurso.

Resumidamente, a Mina de Conceição possui cerca de 77 milhões de toneladas de itabirito dolomítico e 13 milhões de toneladas de hematita dolomítica, sendo estes subdivididos em 1,1 milhões de recursos medidos de hematita dolomítica e 23,9 milhões de toneladas de recursos medidos de itabiritos dolomíticos; 2,7 milhões de toneladas de recursos indicados de hematita dolomítica e 16,3 milhões de toneladas de recursos indicados de itabiritos dolomíticos; 9,2 milhões de toneladas de recursos inferidos de hematita dolomítica e 40 milhões de toneladas de recursos inferidos de itabiritos dolomíticos.

Legenda das tabelas seguintes: Fegl = ferro global; Sigl = sílica global; Pgl = fósforo global; Algl = alumina global; Mngl = manganês global.

**Tabela 3.3 - Recurso total de minério de ferro.**

Modelo de Conceição: cce\_0906.bmf  
Base topográfica de 27/12/2006  
Classificação de Recursos - Final  
Cutoff 20%

Faixas Granulométricas	
G1	+8mm
G2	-8+1mm
G3	-1+0.15mm
G4	-0.15mm

Total_mass	Lito	Fegl	Sigl	Pgl	Algl	Mngl	G1	G2	G3	G4
3 339 810	cg	62.871	3.835	0.068	2.173	0.245	60.365	15.879	6.831	16.926
98 346 355	hc	67.431	2.209	0.023	0.654	0.089	91.049	4.295	1.492	3.165
13 016 250	hdo	64.27	3.836	0.153	1.091	0.1	91.437	2.8	1.254	4.51
94 399 966	hf	67.445	1.817	0.018	0.715	0.18	36.521	19.177	10.123	34.18
7 982 377	hmn	66.802	1.536	0.031	0.853	0.809	39.755	20.252	10.584	29.409
11 567 796	hp	67.293	1.965	0.023	0.622	0.07	7.886	13.061	11.566	67.487
793 054 222	ic	41.568	39.278	0.019	0.41	0.061	96.697	0.882	0.946	1.475
77 193 405	ido	41.338	32.748	0.107	1.175	0.114	97.252	1.365	0.585	0.799
190 197 176	if	44.656	33.792	0.016	0.83	0.073	16.075	13.822	22.082	48.021
12 003 835	ih	60.457	11.536	0.023	0.908	0.115	55.042	12.119	10.723	22.116
10 939 480	imn	46.418	27.837	0.041	1.597	1.676	26.011	17.628	14.776	41.585
221 615 327	is	42.578	37.201	0.013	0.644	0.105	52.737	10.531	13.775	22.958
<b>1 533 655 998</b>		<b>46.083</b>	<b>32.131</b>	<b>0.024</b>	<b>0.595</b>	<b>0.097</b>	<b>74.388</b>	<b>5.7</b>	<b>6.324</b>	<b>13.589</b>

Tabela 3.4 - Recurso medido de minério de ferro.

Modelo de Conceição: cce\_0906.bmf  
 Base topográfica de 27/12/2006  
 Classificação de Recursos - Final  
 Cutoff 20%

Faixas Granulométricas	
G1	+8mm
G2	-8+1mm
G3	-1+0.15mm
G4	-0.15mm

Total_mass	Lito	Fegl	Sigl	Pgl	Algl	Mngl	G1	G2	G3	G4
1 117 806	cg	65.723	2.381	0.044	1.398	0.109	51.341	13.542	7.387	27.731
61 059 507	hc	67.42	2.245	0.021	0.665	0.086	90.564	4.505	1.592	3.339
1 125 000	hdo	63.719	4.242	0.169	1.168	0.067	97.989	0.678	0.336	0.998
63 977 412	hf	67.469	1.788	0.017	0.723	0.185	35.382	19.747	10.377	34.495
5 873 223	hmn	66.949	1.469	0.028	0.875	0.71	43.109	20.114	10.109	26.669
7 910 897	hp	67.469	1.811	0.02	0.658	0.056	7.238	12.922	11.646	68.194
333 649 593	ic	40.36	40.972	0.017	0.439	0.053	97.053	0.754	0.932	1.261
23 890 027	ido	41.739	32.579	0.084	0.857	0.113	99.218	0.379	0.177	0.226
155 751 222	if	44.533	34.118	0.013	0.778	0.068	16.749	13.962	22.302	46.987
9 665 216	ih	60.182	12.003	0.02	0.922	0.096	54.967	11.865	10.607	22.561
6 646 386	imn	45.682	28.829	0.04	1.238	1.962	34.196	16.115	14.541	35.148
141 958 214	is	43.305	36.356	0.011	0.603	0.077	54.061	10.291	13.938	21.711
<b>812 624 502</b>		<b>46.685</b>	<b>31.396</b>	<b>0.018</b>	<b>0.604</b>	<b>0.096</b>	<b>66.532</b>	<b>7.251</b>	<b>8.476</b>	<b>17.741</b>

Tabela 3.5 - Recurso indicado de minério de ferro.

Modelo de Conceição: cce\_0906.bmf  
 Base topográfica de 27/12/2006  
 Classificação de Recursos - Final  
 Cutoff 20%

Faixas Granulométricas	
G1	+8mm
G2	-8+1mm
G3	-1+0.15mm
G4	-0.15mm

Total_mass	Lito	Fegl	Sigl	Pgl	Algl	Mngl	G1	G2	G3	G4
935 409	cg	62.857	3.242	0.119	2.263	0.267	67.159	14.541	5.827	12.474
30 304 229	hc	67.561	2.045	0.022	0.647	0.09	91.573	4.138	1.365	2.924
2 711 250	hdo	64.215	4.28	0.202	0.961	0.12	76.71	6.941	3.35	12.999
23 414 107	hf	67.324	1.963	0.02	0.684	0.188	38.712	18.263	9.757	33.268
2 068 425	hmn	66.409	1.71	0.038	0.792	1.078	30.346	20.67	11.919	37.065
2 149 903	hp	66.621	2.788	0.026	0.444	0.139	8.475	14.072	11.525	65.927
175 847 672	ic	41.897	39.024	0.016	0.381	0.064	97.124	0.743	0.754	1.379
16 328 232	ido	44.798	27.113	0.106	1.021	0.111	98.548	0.702	0.344	0.406
16 636 184	if	46.729	30.341	0.028	1.043	0.107	14.277	13.8	19.799	52.125
2 078 135	ih	61.541	9.627	0.035	0.869	0.188	55.33	13.082	11.236	20.353
3 826 872	imn	48.094	25.884	0.043	2.098	1.075	13.111	20.036	15.041	51.812
37 107 385	is	43.412	35.989	0.014	0.63	0.124	53.466	10.159	12.601	23.774
<b>313 407 802</b>		<b>47.658</b>	<b>29.981</b>	<b>0.025</b>	<b>0.565</b>	<b>0.109</b>	<b>80.113</b>	<b>4.821</b>	<b>4.307</b>	<b>10.759</b>

**Tabela 3.6 - Recurso medido+indicado de minério de ferro.**

Modelo de Conceição: cce\_0906.bmf  
 Base topográfica de 27/12/2006  
 Classificação de Recursos - Final  
 Cutoff 20%

Faixas Granulométricas	
G1	+8mm
G2	-8+1mm
G3	-1+0.15mm
G4	-0.15mm

Total_mass	Lito	Fegl	Sigl	Pgl	Algl	Mngl	G1	G2	G3	G4
2 053 215	cg	64.417	2.773	0.078	1.792	0.181	58.547	13.997	6.676	20.78
91 363 736	hc	67.467	2.179	0.021	0.659	0.087	90.899	4.383	1.517	3.201
3 836 250	hdo	64.07	4.269	0.192	1.022	0.104	82.95	5.104	2.466	9.48
87 391 519	hf	67.43	1.835	0.018	0.713	0.186	36.274	19.349	10.211	34.166
7 941 648	hmn	66.808	1.532	0.031	0.853	0.806	39.785	20.259	10.58	29.377
10 060 800	hp	67.288	2.02	0.021	0.612	0.074	7.502	13.168	11.62	67.71
509 497 265	ic	40.89	40.3	0.017	0.419	0.057	97.078	0.75	0.871	1.302
40 218 259	ido	42.981	30.36	0.093	0.924	0.112	98.946	0.51	0.245	0.299
172 387 406	if	44.745	33.754	0.014	0.804	0.072	16.51	13.946	22.06	47.483
11 743 350	ih	60.422	11.583	0.023	0.913	0.112	55.031	12.08	10.718	22.17
10 473 258	imn	46.563	27.753	0.041	1.552	1.638	26.492	17.548	14.724	41.237
179 065 599	is	43.327	36.28	0.012	0.609	0.087	53.938	10.264	13.661	22.139
<b>1 126 032 304</b>		<b>46.956</b>	<b>31.002</b>	<b>0.02</b>	<b>0.593</b>	<b>0.099</b>	<b>70.312</b>	<b>6.575</b>	<b>7.316</b>	<b>15.798</b>

**Tabela 3.7 - Recurso inferido de minério de ferro.**

Modelo de Conceição: cce\_0906.bmf  
 Base topográfica de 27/12/2006  
 Classificação de Recursos - Final  
 Cutoff 20%

Faixas Granulométricas	
G1	+8mm
G2	-8+1mm
G3	-1+0.15mm
G4	-0.15mm

Total_mass	Lito	Fegl	Sigl	Pgl	Algl	Mngl	G1	G2	G3	G4
1 286 595	cg	60.404	5.529	0.053	2.78	0.348	63.266	18.883	7.077	10.775
6 982 619	hc	66.965	2.599	0.041	0.594	0.11	93.009	3.133	1.174	2.684
9 180 000	hdo	64.354	3.655	0.137	1.12	0.098	94.984	1.837	0.747	2.433
7 008 448	hf	67.634	1.598	0.021	0.744	0.114	39.593	17.03	9.026	34.352
40 729	hmn	65.625	2.361	0.045	0.838	1.426	33.874	18.987	11.361	35.779
1 506 996	hp	67.325	1.598	0.031	0.69	0.045	10.446	12.349	11.208	65.998
283 556 957	ic	42.785	37.441	0.023	0.394	0.068	96.012	1.12	1.082	1.786
36 975 146	ido	39.551	35.346	0.122	1.449	0.115	95.41	2.294	0.954	1.342
17 809 770	if	43.79	34.163	0.028	1.081	0.087	11.857	12.623	22.286	53.234
260 484	ih	62.035	9.45	0.035	0.684	0.221	55.51	13.883	10.949	19.658
466 222	imn	43.155	29.728	0.032	2.611	2.54	15.214	19.425	15.959	49.403
42 549 728	is	39.424	41.079	0.02	0.793	0.183	47.685	11.654	14.256	26.407
<b>407 623 694</b>		<b>43.673</b>	<b>35.25</b>	<b>0.035</b>	<b>0.599</b>	<b>0.091</b>	<b>85.647</b>	<b>3.281</b>	<b>3.583</b>	<b>7.489</b>

## Caracterização Mineralógica

Neumann et al. (2004) descrevem que na fase de caracterização tecnológica de matérias-primas minerais, análises mineralógicas constituem-se em recurso essencial na identificação dos constituintes e determinação de suas propriedades.

São de grande importância as técnicas de análise que possibilitam a quantificação das espécies minerais, viabilizando a determinação da paragenese mineral e do grau de liberação do mineral útil.

As técnicas que acessam a observação e a identificação das espécies minerais são fundamentais na determinação dos parâmetros da matéria-prima mineral, sejam eles mineralógicos ou não. As mais usuais, aplicadas à caracterização, estão resumidas na tabela 3.8.

**Tabela 3.8 - Técnicas de mineralogia utilizadas na caracterização de minérios.**

<i>Técnica</i>		<i>Propriedades</i>
<b>Microscopia Óptica</b>	microscópios estereoscópicos	forma, cor, alterações,
	microscópios ópticos de polarização	associações, propriedades ópticas
<b>Difração de Raios-X</b>	método do pó	estrutura cristalina, identificação dos minerais
	câmara de monocristal	
<b>Microscopia Eletrônica de Varredura</b>	microscópio eletrônico de varredura (MEV)	forma, associações, liberação

#### 3.4.4 Microscopia Óptica

De acordo com Neumann et al. (2004) a microscopia óptica é o recurso mais básico e tradicional, tanto utilizando microscópios estereoscópicos como petrográficos. Destaca-se que a mineralogia de apoio à caracterização é essencialmente relacionada com partículas minerais, monominerálicas ou não, sendo menos frequente a análise em fragmentos de rocha.

Microscópios estereoscópicos, ou lupas binoculares, constituem-se em recursos imprescindíveis na caracterização, desde as primeiras observações das propriedades do material prévias aos estudos, para orientação e planejamento dos mesmos, até o acompanhamento dos ensaios de separação minerais, para refinamento das condições operacionais, bem como na própria identificação mineral (Neumann et al, 2004).

Microscópios petrográficos padrão têm recursos de luz incidente e possibilitam obter os seguintes dados sobre as partículas ou grãos de minerais: formas/habitus, características de superfície, cor e associações minerais: sendo que os mais completos dispõem também de recursos de luz transmitida e sistemas de polarização de luz, possibilitando a determinação de propriedades ópticas. As observações podem ser feitas sem quaisquer montagens de grãos, e a faixa de aumento típica é de 10 a 500 vezes.

Para observações em luz transmitida, própria para minerais transparentes ou translúcidos, vários procedimentos de montagens são usados, conforme o tipo e granulometria do material:

- não fixas, diretamente em lâminas de vidro cobertas por lamínulas, por imersão a óleo ou bálsamo – ideal para grãos límpidos e granulometrias finas (0,300mm a 0,010mm);
- fixas, diretamente em lâminas de vidro cobertas por lamínulas, por imersão e bálsamo cozido ou resina (quando é necessário o arquivamento de amostra);
- seções delgadas através de montagem prévia dos grãos em resina, corte da amostra resinada em fatia, colagem em lâmina de vidro e desbaste até atingir a espessura de lâmina petrográfica (0,030mm), recobrimento com

lamínula (próprio para grãos com recobrimento/impregnação superficial e granulometrias grossas -3,5mm a 0,3mm);

- seções delgadas/polidas obtidas pelo polimento das seções descritas acima (sem recobrimento com lamínula).

Observações em luz refletida, recurso adequado para minerais opacos, exigem confecção de seções polidas, feitas a partir do corte e polimento de montagens dos grãos em resina, sendo que opcionalmente podem-se usar seções delgadas/ polidas.

### **3.4.5 Difração de Raios-X**

Neumann et al (2004) definem a difratometria de raios-X como uma das principais técnicas de caracterização mineralógica de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento. É uma metodologia que permite a determinação das fases a partir de espectro gerado pela estrutura cristalina, sendo uma ferramenta extremamente útil na identificação das espécies minerais. É comumente aplicada em duas modalidades básicas: método do pó e câmaras de monocristal.

Os raios-X, ao atingirem um material, podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios-X, após a colisão com o elétron, muda sua trajetória mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. Sob o ponto de vista da física ondulatória, pode-se dizer que a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida; cada elétron atua, portanto, como centro de emissão de raios-X.

Se os átomos que geram este espalhamento estiverem arranados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina, apresentando entre eles distâncias próximas ao do comprimento de onda da radiação incidente, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que efeitos de difração dos raios-X podem ser observados em vários ângulos.

Considerando-se dois ou mais planos de uma estrutura cristalina, as condições para que ocorra a difração de raios-X (interferência construtiva ou numa mesma fase) vão depender da diferença de caminho percorrida pelos raios-X e o comprimento de onda da radiação incidente. Esta condição é expressa pela Lei de Bragg verificada para radiação monocromática, ou seja,

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

onde  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente,  $n$  a um número inteiro (ordem de difração),  $d$  à distância interplanar para o conjunto de planos hkl (índice de Miller) da estrutura cristalina e  $\theta$  ao ângulo de incidência dos raios-X (medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos).

#### **3.4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura**

A microscopia eletrônica de varredura é a técnica de caracterização microestrutural mais versátil hoje disponível, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento. Produz a imagem resultante da interação de um feixe de elétrons com a amostra, permitindo aumentos de 30 a 100.000 vezes (Neumann et al, 2004)

A interação de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área ou o volume a ser analisado gera uma série de sinais que podem ser utilizados para caracterizar propriedades da amostra, tais como composição, superfície topográfica, cristalografia, etc.

O microscópio eletrônico de varredura, quando conjugado com detectores de elétrons retroespalhados, permite a distinção entre espécies minerais pela diferença de número atômico médio dos elementos constituintes, através de tons de cinza.

Na microscopia eletrônica de varredura, os sinais de maior interesse referem-se usualmente às imagens de elétrons secundários e de elétrons retroespalhados, ao passo que, na microsonda eletrônica, o sinal de maior interesse corresponde aos raios-X característicos, resultantes do bombardeamento do feixe de elétrons sobre a amostra, permitindo a definição

qualitativa ou quantitativa dos elementos químicos presentes no microvolume. No presente estudo, usou-se a microanálise por espectrometria de raios-X por dispersão de energia (EDS).

### **3.5 Mineralogia das Amostras**

#### *Hematita (Dana, 1981)*

A hematita é o mais importante mineral de ferro, e também o mineral de maior significado, encontrado nos minérios pré-cambrianos. Em termos químicos, a hematita é considerada como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  puro, com 69,94% de ferro e 30,06% de oxigênio.

#### *Principais propriedades*

Cristalografia: sistema hexagonal, classe escalonoédrica hexagonal;

- Habitus: cristais tabulares, entre espessos e delgados, placas agrupadas em forma de roseta; terrosa; configuração botroidal e remiforme; micácea e laminada, especular, também em grãos equiaxiais; pseudomorfa segundo magnetita (variedade martita);
- Clivagem: [0001] e [1011] com ângulos quase cúbicos;
- Dureza (escala de Mohs): 5,5 a 5,6;
- Peso específico:  $5,26\text{g/cm}^3$ ;
- Brilho: metálico nos cristais e opaco nas variedades terrosas;
- Cor: castanho avermelhado a preto, traço vermelho;
- Em geral, fracamente magnético ou não magnético (paramagnético);  
Translúcido a opaco.

#### *Goethita (Dana, 1981)*



A goethita é um dos minerais mais comuns e se forma, sob condições de oxidação, como produto de intemperismo dos minerais portadores de ferro. Forma-se, também, como precipitado direto, inorgânico ou biogênico, sendo amplamente disseminado, como depósito em pântanos e fontes. A fórmula estrutural é:  $\text{FeO}(\text{OH})$ . Em termos químicos, a composição da goethita pode ser expressa da seguinte forma:

- 62,9% de ferro, 27,0% de oxigênio e 10,1% de água.
- O manganês também pode ser encontrado em composições superiores a 5,0%. A goethita que ocorre nos minérios de ferro apresenta estrutura variável, que vai desde um material maciço até um material celular de cor amarelo-ocre.

As cavidades dos minérios de ferro são frequentemente preenchidas com uma fina camada de goethita, que apresenta bandamento coliforme ou mamilar. Essas camadas sugerem deposição coloidal e essa estrutura é conhecida como goethita botrioidal. A origem coloidal da maior parte da goethita presente nos minérios de ferro é responsável por importantes relacionamentos geoquímicos.

#### Principais propriedades

- Cristalografia: sistema ortorrômbico, classe bipiramidal;
- Habitus: massas esféricas, maciça, coliforme, botrioidal, remiforme, estalactítica, em agregados fibrosos radicais, laminada;
- Clivagem: 010 perfeita;
- Dureza (escala de Mohs): 5,0 a 5,6;
- Peso específico:  $4,4\text{g/cm}^3$ ;
- Brilho: adamantino a opaco, sedoso em certas variedades finamente fibrosas;
- Cor: castanho amarelado, traço castanho-amarelado;
- Não magnético (paramagnético);
- Subtranslúcido.

### *Dolomita*

Carbonato de cálcio e magnésio ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Mineral parecido com a calcita, usado para fazer cimento, cal e na correção da acidez em altos-fornos e solo.

#### Principais Propriedades

- Cristalografia: trigonal
- Hábitus: romboedros
- Clivagem: perfeitas romboédricas
- Dureza (escala de Mohs): 3,5 a 4
- Peso específico: 2,8 a 2,9g/cm<sup>3</sup>
- Brilho: vítreo gorduroso
- Cor: branca, cinza, rosada
- Fratura: friável, conchoidal
- Transparência: transparente a translúcida

### *Magnesita*

É um mineral de carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ). O magnésio pode ser substituído por ferro, formando-se uma serie isomorfa com a siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). Pode conter pequenas quantidades de níquel, cobalto, cálcio e manganês. A magnesita pode ocorrer em veios ou como produto de alteração de rochas ricas em magnésio em zonas de metamorfismo regional ou de contato.

#### Principais propriedades

- Cristalografia: trigonal ou romboédrico
- Hábitus: maciço raramente como romboedro e prismas hexagonais
- Clivagem: 1011 (perfeita)
- Dureza (escala de Mohs): 3,5 - 4,5
- Peso específico: 3,0 a 3,2 g/cm<sup>3</sup>
- Brilho: vítreo

- Fratura: conchoidal
- Risco: branco
- Cor: incolor, branca, amarelo pálido, marrom pálido, levemente rosa, lilás-rosa.

### *Quartzo*

É o segundo mineral mais abundante depois dos feldspatos, na crosta terrestre. É um óxido de silício. A fórmula estrutural é  $\text{SiO}_2$ . Mineral muito resistente ao intemperismo e ao desgaste físico; é o mais abundante nos sedimentos litorâneos, principalmente praias.

### Principais Propriedades

- Cristalografia: trigonal
- Hábito: prismático a granular
- Clivagem: não apresenta
- Dureza (escala de Mohs): 7,0
- Peso específico: 2,6 a 2,65  $\text{g/cm}^3$
- Brilho: vítreo
- Cor: incolor, amarelo, roxo, rosa, branco leitoso,
- Fratura: conchoidal (típica)
- Transparência: transparente
- Traço: branco

### *Calcita*

Principal constituinte das rochas carbonáticas, em especial o mármore. Além de branca, a cor mais comum, pode ser incolor, azul, amarela, esverdeada, vermelha, cinza. A fórmula estrutural é  $\text{CaCO}_3$ .

Facilmente riscada, assim como as rochas onde ocorre em grande quantidade, como o mármore. Facilmente atacada por soluções ácidas, é dissolvida pela água levemente acidificada pelo gás carbônico, dando origem a relevos interessantes (cárstico, reniforme). Em contato com soluções mais ácidas, entra em efervescência, devido ao rápido desprendimento do gás carbônico. Usada na fabricação de cimento e cal. Como mármore é usada na construção. Como calcário é usada na agricultura na calagem do solo (correção da acidez)

### Principais Propriedades

- Cristalografia: trigonal ou romboédrico
- Hábitus: granular, sacaroidal, romboedro
- Clivagem: 3 direções de clivagem proeminentes, dando origem a formas romboédricas (losango).
- Dureza (escala de Mohs): 3
- Peso específico: 2,71 g/cm<sup>3</sup>
- Brilho: vítreo, resinoso
- Cor: incolor, branca, azul, amarela, vermelha, cinza
- Fratura: irregular,
- Transparência: transparente a translúcido
- Traço: branco

### *Ankerita*

É um mineral do grupo dos carbonatos. Sua composição química é 39,06% FeO, 30,49% CaO, e 30,45% CO<sub>2</sub>, com presença de pequenas quantidades de magnésio (Mg), manganês (Mn) e mais raramente cério (Ce) y lantânio (La). A fórmula estrutural é Ca (Fe<sup>II</sup>,Mg,Mn) (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

Sua gênese é hidrotermal e metassomática e pode ocorrer junto a dolomitas , sideritas e quartzo.

#### Principais propriedades

- Cristalografia: trigonal ou romboédrico
- Hábitus: granular e maciço
- Clivagem: 001 (Perfeita)
- Dureza (escala de Mohs): 3,5 a 4
- Peso específico: 3,05g/cm<sup>3</sup>
- Brilho: vítreo
- Cor: marrom, amarelo, cinza, branco
- Fratura: subconchoidal
- Transparência: translúcido
- Traço: branco

#### *Clorita*

Cloritas são minerais aluminossilicatos de origem metamórfica, principalmente de Mg, Fe<sup>2+</sup> e Al.

As variedades ricas em Mg denominam-se ortocloritas.

Exemplo de fórmula estrutural: clinocloro: (Mg,Al)<sub>6</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>.

#### Principais propriedades

- Cristalografia: monoclinico ou triclinico
- Hábitus: foleado
- Clivagem: 001 (Perfeita)
- Dureza (escala de Mohs): 2 a 2,5
- Peso específico: 2,6 a 3,3g/cm<sup>3</sup>

- Brilho: vítreo e perláceo
- Cor: verde e raramente amarela, vermelha ou branco
- Fratura: lamelar
- Transparência: translúcido
- Traço: cinza

### *Talco*

É um silicato hidratado de magnésio. Usado em tintas, na indústria papelreira e na indústria alimentícia. Moído finamente e odorizado é usado como cosmético. Rochas muito ricas em talco (esteatita ou pedra-sabão) podem ser facilmente talhadas, esculpidas e torneadas, apresentando um bom brilho após polimento.

Forma de ocorrência: Mineral de origem secundária, formado pela alteração de silicatos de magnésio, como: olivina, piroxênio e anfibólio.

### Principais Propriedades

- Cristalografia: monoclinico
- Habitus: lamelar, maciço,
- Dureza (escala de Mohs): 1,0
- Peso específico: 2,7 a 2,8g/cm<sup>3</sup>
- Brilho: perláceo a untuoso
- Cor: cinza, verde claro, prateado
- Fratura: irregular
- Transparência: translúcido
- Traço: incolor
- Fórmula Química:  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_4$ .

### *Caulinita*

É um silicato de alumínio hidratado formado pela decomposição do feldspato e outros silicatos de alumínio. Esta decomposição se deve aos efeitos

prolongados de intemperismo. A formação de caulinita se deve a alteração de feldspato por ação de água e dióxido de carbono. Fórmula química dos minerais do grupo da caulinita:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Ocorre sob a forma de alteração de feldspatos, feldspatóides e outros silicatos, durante o intemperismo químico e também hidrotermal em rochas cristalinas (caulim primário). Pode formar-se também por processos diagenéticos em bacias sedimentares.

#### Principais Propriedades

- Cristalografia: Triclínico
- Habitus: lamelar, maciço
- Dureza (escala de Mohs): 2,0
- Peso específico:  $2,6\text{g/cm}^3$
- Brilho: terroso, perláceo
- Cor: branca
- Fratura: irregular
- Transparência: translúcido a opaco
- Traço: branco
- Fórmula Química:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

#### *Apatita*

Nome genérico de um importante grupo de minerais, cuja composição geral é fosfato de cálcio podendo ser hidratado e/ou conter flúor e/ou cloro. Importante fonte de fósforo na produção de superfosfatos de uso na agricultura. É relativamente comum apesar de ser raro em concentrações economicamente lavráveis. Apesar de sua pouca dureza é usado como gema em função de sua coloração. Apatita é um nome genérico para vários fosfatos: fluorapatita, cloroapatita, carbonato-fluorapatita e hidroxiapatita. Estes minerais são de difícil identificação por métodos expeditos, daí o uso do nome genérico apatita. No geral, na literatura, o termo apatita é usado para se referir à fluorapatita.

#### Principais propriedades

- Cristalografia: hexagonal
- Hábito: maciço, raramente prismático
- Dureza (escala de Mohs): 5,0
- Clivagem: indistinta
- Cor: branco, amarelo, verde, azul e vermelho
- Fratura: conchoidal
- Transparência: transparente a translúcido
- Peso específico: 3,19g/cm<sup>3</sup>
- Brilho: vítreo.
- Traço: branco.
- Fórmula química (genérica): Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH,F,Cl).

### *Pirolusita*

A pirolusita é um mineral composto basicamente de dióxido de manganês. Pode ocorrer em massas fibrosas, em massas botrioidais, em massas granulares, em cristais aciculares agrupados em leque e em inclusões dendríticas sobre outros minerais e rochas.

É o mais importante mineral-minério de manganês (63% Mn), sendo usado em baterias elétricas, vidros, fotografias, produtos químicos e vários outros produtos. É de extrema importância para a indústria siderúrgica pois serve para obter o metal manganês, aplicado principalmente na produção do aço, que utiliza 1,5% de manganês em relação ao minério de ferro.

### Principais Propriedades

- Cristalografia: tetragonal.
- Dureza: 1-2 nas massas e 6-6,5 nos cristais.
- Peso específico: 4,5-7,9g/cm<sup>3</sup>.
- Clivagem: perfeita.



- Fratura: desigual.
- Cores: preta, cinza escura, marrom clara.
- Cor do traço: preto.
- Brilho: submetálico.
- Transparência: translúcida e opaca.
- Fórmula química:  $\text{MnO}_2$ .

### *Gipsita*

É um sulfato hidratado de cálcio. Também designada por pedra de gesso. Usada principalmente na fabricação de ácido sulfúrico, cerveja, moldes para fundição, giz, vidros, esmaltes, aglutinante, corretivo de solo e indústrias metalúrgicas.

#### Principais propriedades

- Grupo: Sulfatos
- Cristalografia: monoclinico
- Fórmula química:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Dureza: 1,5-3 (escala de Mohs)
- Peso específico:  $2,32\text{g/cm}^3$
- Clivagem: perfeita
- Fratura: conchoide
- Cor: Incolor, branco a cinza, amarelo, vermelho, castanho
- Cor do traço: branca
- Brilho: ceroso
- Fórmula química:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Amostras de minérios

Os materiais testados, minérios ferríferos dolomíticos, que ocorrem na Mina de Conceição apresentam-se inseridos no Grupo Itabira, Formação Cauê e podem ser separados em dois litotipos: itabiritos dolomíticos e hematitas dolomíticas.



**Figura 4.1 - Afloramento de Itabirito dolomítico.**

Foram coletadas amostras dos afloramentos (figura 4-1) na cava da Mina e homogeneizadas até obter massa de aproximadamente 10 toneladas de minério dolomítico que foi transportada até o Centro Tecnológico de Ferrosos da Vale S.A.

## 4.2 Preparação da Amostra

A amostra foi submetida a preparação, conforme fluxograma ilustrado na Figura 4-2.

As etapas para preparação da amostra para a obtenção da granulometria adequada aos testes foram:

- Registro da massa total das amostras e das etapas de preparação;
- Adequação do top size das amostras naturais que foi – 50,0mm;
- Britagem de toda a amostra abaixo de 32,0mm;
- Peneiramento em 8mm do material britado em 32,0mm. Pesagem das duas massas;
- Britagem do material -32,0+8,0mm (exceto a amostra arquivada) em 8mm (britado somente o retido);
- Agregadas as duas massas de -8mm conforme apresentado na figura 4-2;
- Arquivamento da reserva da granuloquímica (mantendo as faixas separadas) para utilização na mineralogia (granulado: figura 4.3, sinter feed: figura 4.4);
- Geração da planilha granuloquímica completa: perda ao fogo, FeO, MnO, TiO<sub>2</sub>, CaO, MgO;
- As análises foram realizadas da seguinte maneira: Fe, FeO e PPC por via úmida e os demais elementos por fluorescência de raios X com pastilha fundida.

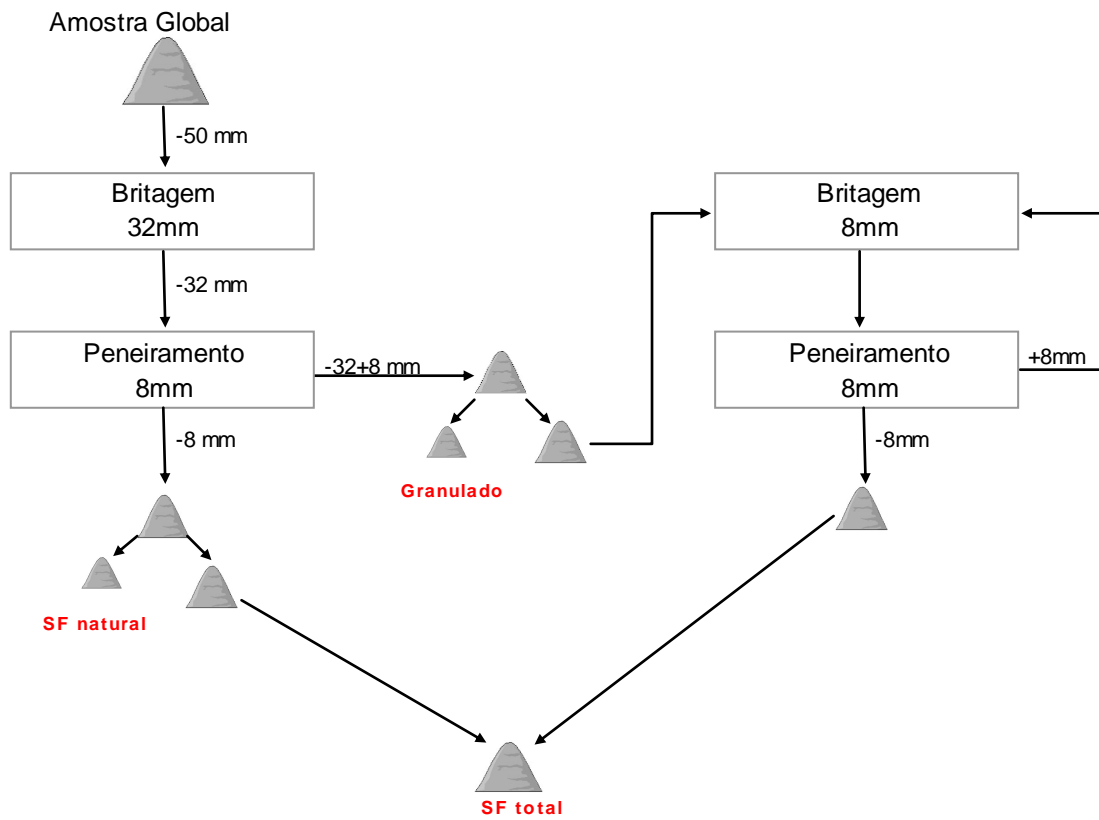


Figura 4.2 - Fluxograma da amostragem.

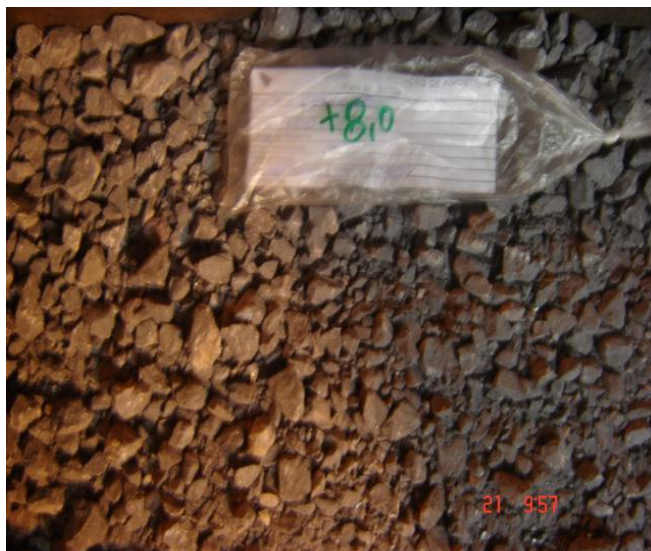


Figura 4.3 - Amostra: -31,00mm + 8,00mm (Granulado).



Figura 4.4 - Amostra: - 8,00mm (SF- Sinter Feed / PF- Pellet Feed).

### 4.3 Caracterização

Os produtos (granulados e sinter feeds) gerados foram caracterizados, através de análises químicas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e análises granulométricas (AG). Os teores de FeO, importantes para se quantificar a magnetita e outros minerais portadores de  $Fe^{+2}$ , foram dosados por via úmida. A perda por calcinação (PPC) foi determinada por gravimetria. Numa segunda etapa, foram realizadas análises mineralógicas por difração de raios-X de todas as amostras globais e das respectivas frações granulométricas importantes.

A terceira fase da caracterização dos produtos é a descrição microestrutural das amostras globais (granulados) e das principais frações granulométricas dos sinter feeds. Este estudo foi feito por microscopia óptica de luz refletida (MOLR) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV), acompanhada de microanálise por espectrometria de raios-X por dispersão de energia (EDS).



#### 4.4 Ensaios físicos e metalúrgicos

As amostras de grande volume foram submetidas a testes de porosimetria de intrusão de mercúrio, com a determinação dos seguintes parâmetros:

- volume total de intrusão;
- porosidade total;
- densidade aparente;
- densidade bulk;
- diâmetro médio dos poros;
- área total dos poros.

Para determinação das qualidades metalúrgicas, as amostras foram submetidas aos testes:

- ensaio de tamboramento ISO 3271 (Tumbler Index);
- ensaio de crepitação ISO 8371;
- ensaio de degradação sob redução estática (RDI) ISO4692-2.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Dados granuloquímicos

A Tabela 5-1 mostra que aproximadamente metade da massa global se situa na faixa granulado (-32,0mm+8,0mm), com baixos teores de SiO<sub>2</sub> e teores de CaO e MgO significativos, sendo o teor de CaO maior. Notam-se ainda, nos produtos, teores de Mn da ordem de 0,3% e teores de P entre 0,061 e 0,070%.

**Tabela 5.1 - Análises químicas em amostra de grande volume (10t).**

Amostras	Massa (%)	Fe( % )	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P(%)	Mn(%)	MgO(%)	CaO(%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PF(%)
Amostra Global calculada	100	53,20	5,35	0,54	0,065	0,305	3,451	5,454	0,027	8,89
Amostra Global analisada	100	52,33	6,11	0,99	0,062	0,355	3,549	5,200	0,031	8,98
Granulado (-32 + 8,0 mm)	66,70	52,35	1,67	0,49	0,070	0,261	4,355	7,220	0,015	11,47
-8,00 mm	33,30	54,89	12,73	0,63	0,056	0,394	1,640	1,917	0,052	3,71

A Tabela 5-2 mostra a análise granulométrica nas aberturas de 25,00mm a -0,045mm para a fração granulado e análise nas aberturas de 25,00mm a -0,009mm para a fração sinter/pellet feed.

Tabela 5.2 - Análises granulométricas em amostra de grande volume (10t).

Certificado de Análises Físicas										
Amostra	-32 mm			Granulado			Amostra	8,0 mm		
Abertura (mm)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante	Abertura (mm)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante
<b>25,00</b>	10,01	10,01	89,99	12,32	12,32	87,68	<b>25,00</b>	0,00	0,00	100,00
<b>19,00</b>	19,12	29,13	70,87	22,10	34,42	65,58	<b>19,00</b>	0,00	0,00	100,00
<b>16,00</b>	10,28	39,41	60,59	14,39	48,81	51,19	<b>16,00</b>	0,00	0,00	100,00
<b>12,50</b>	7,56	46,97	53,03	13,84	62,65	37,35	<b>12,50</b>	0,00	0,00	100,00
<b>9,50</b>	6,19	53,16	46,84	12,72	75,37	24,63	<b>9,50</b>	0,00	0,00	100,00
<b>8,00</b>	3,33	56,50	43,50	7,53	82,90	17,10	<b>8,00</b>	0,00	0,00	100,00
<b>6,30</b>	2,53	59,03	40,97	7,12	90,02	9,98	<b>6,30</b>	0,06	0,06	99,94
<b>5,60</b>	1,12	60,15	39,85	3,31	93,33	6,67	<b>5,60</b>	0,57	0,62	99,38
<b>4,75</b>	1,91	62,05	37,95	3,32	96,65	3,35	<b>4,75</b>	2,61	3,23	96,77
<b>3,36</b>	2,85	64,90	35,10	1,55	98,20	1,80	<b>3,36</b>	6,24	9,47	90,53
<b>2,35</b>	2,85	67,75	32,25	0,30	98,50	1,50	<b>2,35</b>	7,29	16,76	83,24
<b>1,00</b>	3,86	71,62	28,38	0,19	98,69	1,31	<b>1,00</b>	8,91	25,67	74,33
<b>0,84</b>	0,17	71,79	28,21	0,01	98,70	1,30	<b>0,84</b>	0,59	26,26	73,74
<b>0,71</b>	0,70	72,49	27,51	0,03	98,73	1,27	<b>0,71</b>	1,72	27,98	72,02
<b>0,50</b>	0,95	73,44	26,56	0,04	98,76	1,24	<b>0,50</b>	2,61	30,58	69,42
<b>0,42</b>	0,59	74,02	25,98	0,03	98,79	1,21	<b>0,42</b>	1,37	31,96	68,04
<b>0,300</b>	1,16	75,18	24,82	0,04	98,83	1,17	<b>0,300</b>	2,63	34,59	65,41
<b>0,250</b>	0,57	75,75	24,25	0,01	98,84	1,16	<b>0,250</b>	1,64	36,23	63,77
<b>0,210</b>	0,80	76,55	23,45	0,02	98,86	1,14	<b>0,210</b>	1,94	38,17	61,83
<b>0,150</b>	1,79	78,34	21,66	0,06	98,92	1,08	<b>0,150</b>	5,59	43,76	56,24
<b>0,106</b>	3,17	81,51	18,49	0,08	99,00	1,00	<b>0,106</b>	7,69	51,44	48,56
<b>0,075</b>	2,97	84,48	15,52	0,13	99,13	0,87	<b>0,075</b>	8,77	60,22	39,78
<b>0,062</b>	2,58	87,06	12,94	0,11	99,24	0,76	<b>0,062</b>	6,83	67,04	32,96
<b>0,045</b>	3,64	90,70	9,30	0,23	99,47	0,53	<b>0,045</b>	9,81	76,86	23,14
<b>-0,045</b>	9,30	100,00	0,00	0,53	100,00	0,00	<b>0,030</b>	4,89	81,74	18,26
							<b>0,022</b>	8,04	89,79	10,21
							<b>0,016</b>	3,11	92,90	7,10
							<b>0,011</b>	1,74	94,64	5,36
							<b>0,009</b>	0,78	95,42	4,58
							<b>-0,009</b>	4,58	100,00	0,00



A Tabela 5.3 mostra a imperfeição de peneiramento e finos agregados onde o teor de SiO<sub>2</sub> se concentra na fração abaixo da faixa de 1,00mm.

**Tabela 5.3 - Análise granuloquímica da fração granulada (-32,00+8,00mm).**

Certificado de Análises Físicas - Granulado ( -32 + 8,0 mm)													
Amostra	Granulometria a umido			Teores (%)									
	Abertura (mm)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	PPC
25,00	12,32	12,32	87,68										
19,00	22,10	34,42	65,58	52,08	1,45	0,41	0,084	0,148	2,272	7,326	0,017	12,65	
16,00	14,39	48,81	51,19										
12,50	13,84	62,65	37,35										
9,50	12,72	75,37	24,63	53,54	1,48	0,21	0,074	0,179	2,633	6,870	0,012	11,71	
8,00	7,53	82,90	17,10										
6,30	7,12	90,02	9,98										
5,60	3,31	93,33	6,67										
4,75	3,32	96,65	3,35	56,26	1,19	0,23	0,061	0,324	2,747	5,620	0,017	9,64	
3,36	1,55	98,20	1,80										
2,35	0,30	98,50	1,50										
1,00	0,19	98,69	1,31										
0,84	0,01	98,70	1,30										
0,71	0,03	98,73	1,27										
0,50	0,04	98,76	1,24										
0,42	0,03	98,79	1,21	56,61	4,59	0,63	0,057	0,762	2,170	2,993	0,052	6,53	
0,300	0,04	98,83	1,17										
0,250	0,01	98,84	1,16										
0,210	0,02	98,86	1,14										
0,150	0,06	98,92	1,08										
0,106	0,08	99,00	1,00										
0,075	0,13	99,13	0,87	60,10	5,91	0,49	0,037	0,238	1,492	1,755	0,032	3,61	
0,062	0,11	99,24	0,76										
0,045	0,23	99,47	0,53										
-0,045	0,53	100,00	0,00	57,42	4,74	1,48	0,115	0,762	2,046	2,439	0,079	4,98	
			Global Calculada	53,32	1,47	0,32	0,077	0,192	2,464	6,835	0,016	11,75	
			Global Analisada	52,35	1,67	0,49	0,070	0,261	4,355	7,220	0,015	11,47	

A Tabela 5.4 mostra a análise granulométrica da fração fina, onde se observa que as principais frações abaixo da abertura 0,50mm apresentam elevados teores de SiO<sub>2</sub>.

Tabela 5.4 - Análise granulométrica da fração sinter / pellet (-8,00mm).

Certificado de Análises - Fração - 8,0 mm													
Amostra	Granulometria a umido			Teores (%)									
	Abertura (mm)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	PPC
8,00	0,00	0,00	100,00										
6,30	0,06	0,06	99,94										
5,60	0,57	0,62	99,38										
4,75	2,61	3,23	96,77	58,26	1,52	0,16	0,063	0,242	2,524	4,135	0,022	7,18	
3,36	6,24	9,47	90,53										
2,35	7,29	16,76	83,24										
1,00	8,91	25,67	74,33										
0,840	0,59	26,26	73,74										
0,710	1,72	27,98	72,02	59,07	4,82	0,34	0,057	0,325	2,113	2,989	0,028	5,26	
0,500	2,61	30,58	69,42										
0,420	1,37	31,96	68,04										
0,300	2,63	34,59	65,41										
0,250	1,64	36,23	63,77	47,09	26,60	0,32	0,034	0,183	1,391	1,482	0,031	2,71	
0,210	1,94	38,17	61,83										
0,150	5,59	43,76	56,24										
0,106	7,69	51,44	48,56										
0,075	8,77	60,22	39,78										
0,062	6,83	67,04	32,96	51,72	21,50	0,43	0,023	0,166	0,912	0,741	0,038	1,44	
0,045	9,81	76,86	23,14										
0,030	4,89	81,74	18,26	55,50	8,34	2,18	0,108	1,008	1,494	1,354	0,131	3,79	
0,022	8,04	89,79	10,21	66,98	1,23	0,68	0,026	0,195	0,181	0,113	0,037	0,53	
0,016	3,11	92,90	7,10	64,15	3,25	0,75	0,041	0,188	0,612	0,592	0,066	1,12	
0,011	1,74	94,64	5,36	56,83	8,65	0,72	0,103	0,473	1,726	2,093	0,139	3,66	
0,009	0,78	95,42	4,58	47,12	14,64	2,49	0,347	0,943	3,033	3,622	0,288	6,76	
-0,009	4,58	100,00	0,00	20,40	24,39	18,34	0,518	4,760	7,374	2,240	0,304	12,68	
			Global Calculada	53,57	13,24	1,30	0,068	0,462	1,735	1,910	0,054	3,90	
			Global Analisada	54,89	12,73	0,63	0,056	0,394	1,640	1,917	0,052	3,71	

## 5.2 Avaliação do Granulado

Os resultados dos ensaios químicos (Tabela 5.5) mostram resumidamente que a fração granulado possui teores globais de Fe e SiO<sub>2</sub> relativamente baixos, devido à elevada PPC (perda por calcinação).

Tabela 5.5 - Qualidade Química.

Teores (%)								
Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	PPC
52.35	1.67	0.49	0.070	0.261	4.355	7.220	0.015	11.47

### Ensaio de Porosimetria do Mercúrio

A análise da porosidade pelo método de intrusão de mercúrio foi realizada em um porosímetro Micromeritics modelo Auto-Pore III, nos estágios de baixa e alta pressão (até 60.000 psi). Neste método de análise, o diâmetro dos poros é inversamente proporcional à pressão exercida, ou seja, quanto maior a pressão de intrusão do mercúrio menor é o diâmetro do poro analisado.

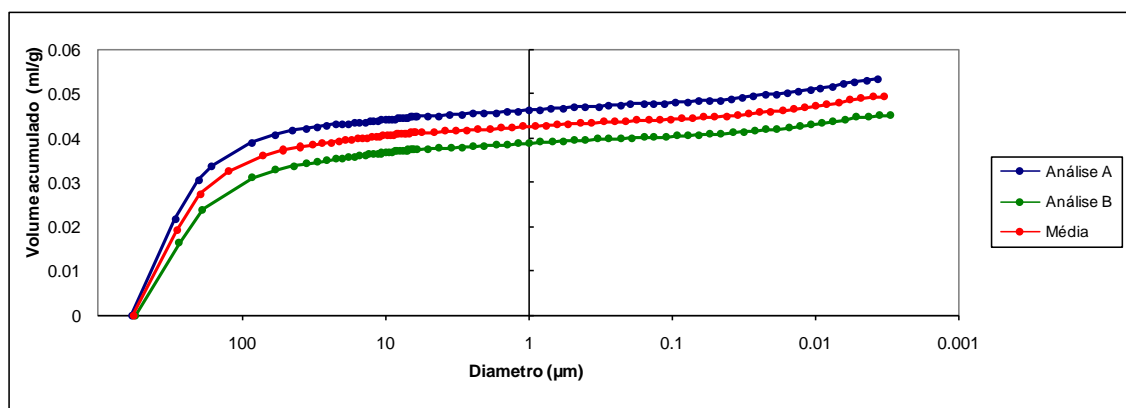
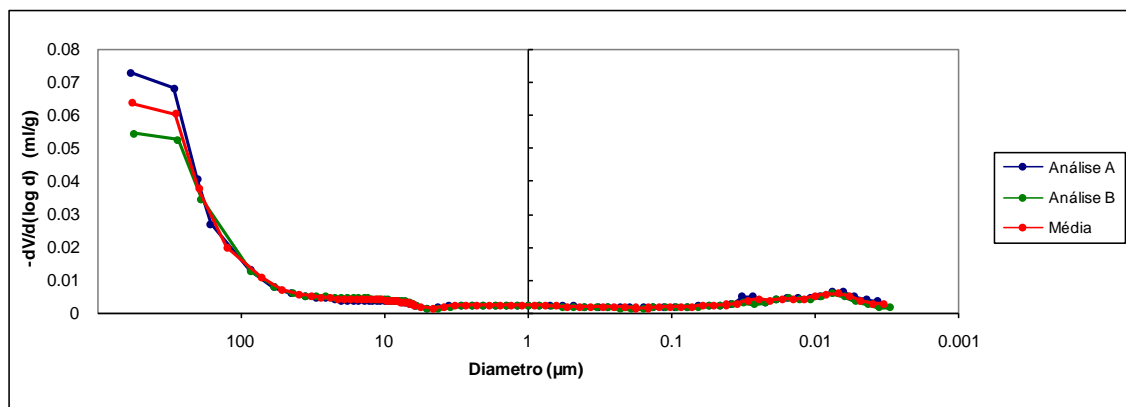
O equipamento citado é capaz de analisar meso e macroporos com diâmetro entre 0,003µm a 360µm. A amostra foi analisada na granulometria de -3,36 a +1,0mm. Os parâmetros obtidos das amostras são a porosidade, volume total de intrusão, densidade *bulk*, diâmetro médio e área total dos poros.

Tabela 5.6 - Análise de Porosidade da amostra.

Condições Analíticas			
	Análise A	Análise B	Média
Massa	6.037 g	6.003 g	6.02 g
Pressão	0,1 à 60000 <i>psia</i>	0,1 à 60000 <i>psia</i>	-
Cód. Porta amostra:	(10B)	(10B)	-
% de util. da haste:	30 %	25 %	-
Densidade do Hg:	13.5335 g/ml	13.5335 g/ml	13.5335 g/ml
Tensão Superficial:	485 <i>dynes/cm</i>	485 <i>dynes/cm</i>	485 <i>dynes/cm</i>
Ângulo de contato:	130 <i>degrees</i>	130 <i>degrees</i>	130 <i>degrees</i>

## Resultados

	Análise A	Análise B	Média
Volume total de intrusão:	0.05 ml/g	0.05 ml/g	0.05 ml/g
Porosidade:	19.49 %	17.03 %	18.26 %
Densidade aparente:	4.49 g/ml	4.53 g/ml	4.51 g/ml
Densidade Bulk:	3.62 g/ml	3.76 g/ml	3.69 g/ml
Diâmetro médio dos poros:	0.09 $\mu\text{m}$	0.10 $\mu\text{m}$	0.09 $\mu\text{m}$
Área total dos poros:	2.44 m <sup>2</sup> /g	1.86 m <sup>2</sup> /g	2.15 m <sup>2</sup> /g



### Critério de validação

Processo de medição:  
 1 - Ensaios em duplicata ( $E_1, E_2$ )  
 2 - Ensaios adicionais ( $E_3, E_4$ ):  
 $E_3 \Rightarrow |E_1 - E_2| > 2,201.S$ ;       $E_4 \Rightarrow |E_1 - E_3| \text{ ou } |E_2 - E_3| > 2,201.S$   
 $S = 1,47$  (DP combinado do equipamento)  
 Considerados 2 resultados com menor diferença

$S = 0,24$  para médias < 4% em SF ou pelotas  
 $S = 1,47$  para médias > 15% em pelotas

$S = 0,61$  para médias > 4% em SF ou pelotas

Parâmetro	Valor	Unidade
Volume total de intrusão	0,05	ml/g
Porosidade	18,26	%
Densidade aparente	4,51	g/ml
Densidade Bulk	3,69	g/ml
Diâmetro médio dos poros	0,09	$\mu\text{m}$
Área total dos poros	2,15	m <sup>2</sup> /g

### 5.3 Ensaio de Tamboramento

A amostra da faixa granulada (-40,00mm+10,00mm) foi submetida ao ensaio de tamboramento (Figura 5.1).

Este ensaio teve por finalidade medir a resistência do material à abrasão, quando submetido ao atrito com as paredes do alto-forno e à própria carga. Esta degradação por ação mecânica pode reduzir a permeabilidade na zona seca do reator, causando distúrbios operacionais ou mesmo perda de produtividade.

No aparelho de tumbler são colocados 15kg de amostra preparada e acionado para girar 200 vezes. Após desligado o aparelho e retirada a amostra, a mesma é submetida a peneiramento nas malhas 6,30mm e 0,5mm. O percentual de material retido na malha de 6,30mm corresponde ao Índice de Tamboramento e o percentual de material passante na malha 0,5mm corresponde ao Índice de Abrasão.

## Ensaio de Tamboramento ISO - 3271 (Tumbler Index - TI)

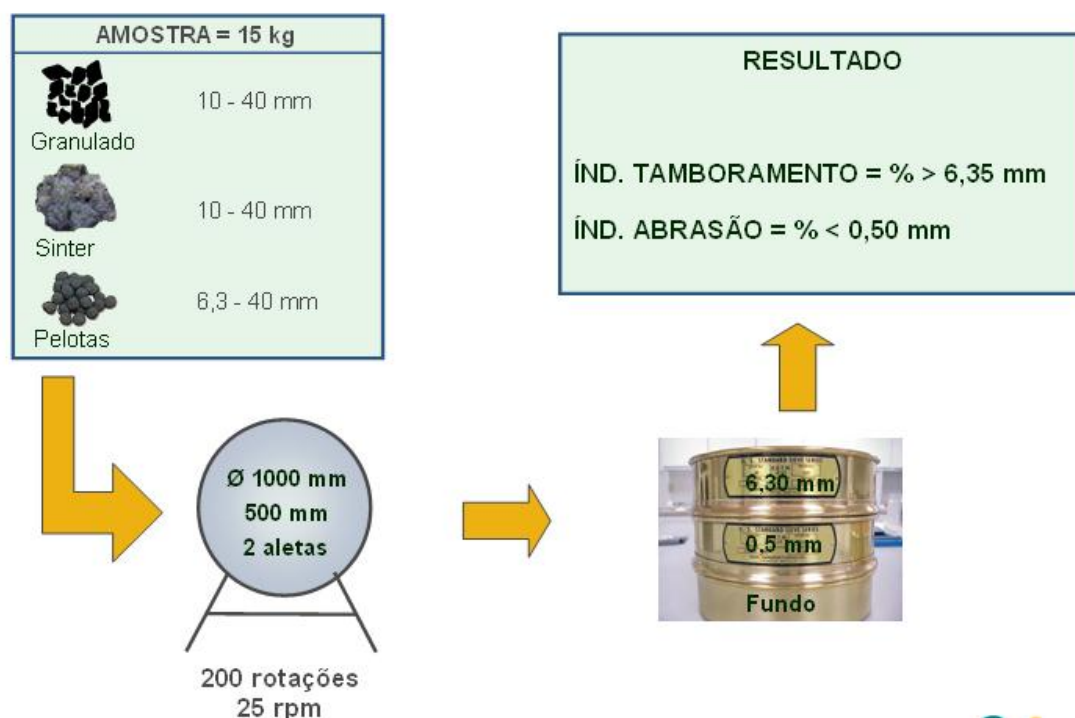


Figura 5.1 - Teste de Tamboramento.

Conforme observado na Tabela 5.7, os resultados do ensaio evidenciaram que o minério dolomítico apresentou bom índice de tamboramento e mediano índice abrasão.

Tabela 5.7 - Resultado do Teste de Tamboramento

TI (% + 6,30mm)	AI (% - 0,50mm)
80,3%	12,9%

Referência para aprovação

Índice de resistência (TI): +6.3 mm > 80 %

Índice de abrasão (AI): - 0,5 mm < 6 %

#### 5.4 Ensaio de Crepitação

Este ensaio de crepitação (figura 5.2) teve por finalidade verificar a resistência do material no início de seu aquecimento no alto-forno. O ideal é que ao crepitar o minério gere menos finos. Maior geração de finos por ação térmica pode reduzir a permeabilidade na zona seca do reator, causando distúrbios operacionais ou mesmo perda de produtividade no alto forno.

A amostra de aproximadamente 500g deve passar por processo de secagem na faixa de  $105^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ , durante um período de mínimo de 12 horas. Após esta etapa são separados os finos de aderência e novamente a amostra é submetida as mesmas condições anteriores por mais 12 horas. Decorrido a secagem, a amostra é levada a mufla a  $700^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos. Retirado material da mufla, o mesmo é submetido a peneiramento e é considerado como Índice de Crepitação o percentual de material retido na peneira de 6,30mm de abertura.

## Ensaio de Crepitação - ISO 8371

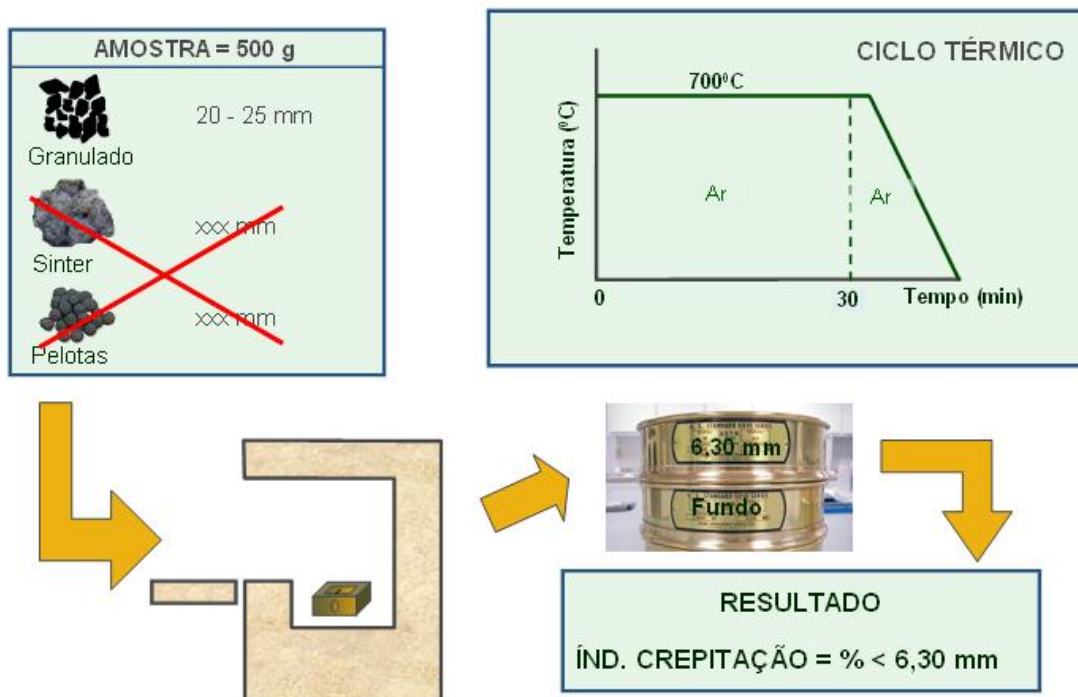


Figura 5.2 - Teste de Crepitação

Conforme observado na Tabela 5.8, o resultado do Teste de Crepitação evidenciou que o minério dolomítico apresentou bons índices de crepitação para os teste de acordo a Norma ISO 8371 como para a COISRJM.

Tabela 5.8 - Resultado do Teste de Crepitação

IC (% - 6,30mm)	IC (% - 4,75mm)
1,1	0,9

Referência para aprovação - ISO 8371

- 6.3 mm  $\leq$  4%

Referência para aprovação - COISRJM

- 4.75 mm  $\leq$  5%



## 5.5 Ensaio de Degradação sob Redução Estática (RDI)

A degradação durante a redução a baixa temperatura chama-se RDI ( Figura 5.3). Tal degradação acontece quando a carga entra em contato com gases redutores no alto-forno. Assim, para a simulação, são utilizados os gases monóxido de carbono e nitrogênio, em temperatura de até 550°C e depois a amostra é submetida a teste de tamboramento com 900 rotações. É considerado índice de RDI o percentual retido na peneira de 2,80mm de abertura.

Maior geração de finos por ação química do gás pode reduzir a permeabilidade na zona seca do reator, causando distúrbios operacionais ou mesmo perda de produtividade.

### Ensaio de Degradação sob Redução Estático (RDI) - ISO 4692-2

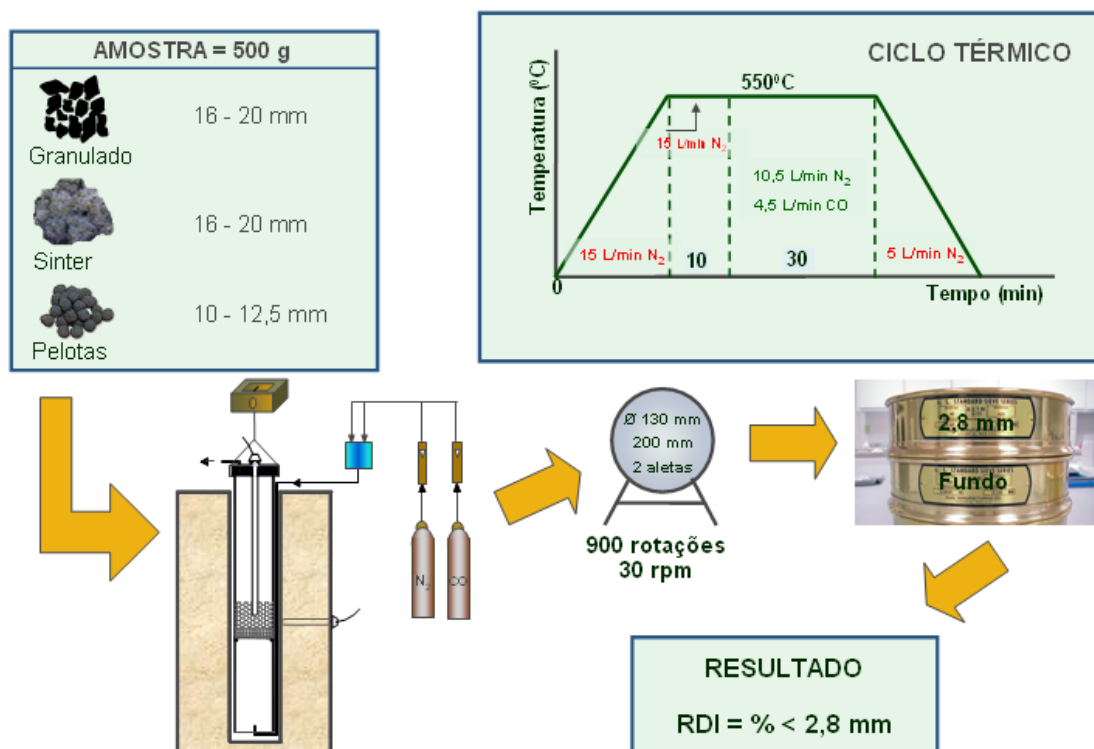


Figura 5.3 - Ensaio de RDI.

Conforme observado na Tabela 5.9, o resultado do ensaio evidenciou que o minério dolomítico não apresentou bons índices de RDI.

**Tabela 5.9 - Resultado do Ensaio RDI.**

RDI (% - 2,80mm)
37,8

Referência de Índice RDI - ISO 4692-2

Índice de Degradação sob redução: - 2,80mm  $\leq$  20%

## 5.6 Avaliação dos Finos (fração -8,00mm)

O resumo da granulometria da fração -8,0mm (Tabela 5-10) indica:

- percentual de lama do material é baixo (4,58%);
- a lama tem altos teores de MgO associados a elevados teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P;
- 51,66% da amostra estão na fração pellet feed sem lama.

**Tabela 5.10 - Análises granuloquímicas da fração -8,0mm.**

Resumo da granuloquímica da fração -8,0 mm										
Fração (mm)	% massa	Teores (%)								
		Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	PPC
-8,0 + 0,15	43,76	54,99	9,44	0,23	0,054	0,234	2,137	3,208	0,025	5,62
-0,15 +0,009	51,66	52,46	16,19	2,13	0,079	0,639	1,423	0,900	0,076	1,66
-0,009	4,58	20,40	24,39	18,34	0,518	4,760	7,374	2,240	0,304	12,68
- 8,0 +0,009	95,42	53,62	13,10	1,26	0,067	0,453	1,750	1,958	0,053	3,47

## 5.7 Análises mineralógicas

### 5.7.1 Microscópio Eletrônico de Varredura

Para a realização de eletronicografias e microanálises de material em grãos, as amostras foram classificadas a úmido em frações compatíveis com a

característica da amostra, metodologia adotada e com as condições instrumentais requeridas. Na montagem das partículas, foi feita a homogeneização da amostra, que é posteriormente montada em stub com fita dupla-face condutora a base de carbono e posteriormente metalizada com Au.

As análises foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura ZEISS modelo EVO-MA15, acoplado com detector EDS INCA X-Sight da Oxford Instruments, modelo 6650 com 10mm<sup>2</sup> de área de detecção, janela ATWZ e resolução de 137eV a 5,9keV e controlado pelo software INCA.

Foram selecionadas algumas imagens mais significativas para ilustrar e corroborar na interpretação. A Tabela 5.11 apresenta o resumo de ocorrência qualitativa das fases minerais na amostra analisadas nas frações: -0,5+0,25mm, -0,25+0,15mm, -0,15+0,075mm, -0,075+0,062mm, -0,062+0,045mm, -0,045mm.

**Tabela 5.11 - Composição qualitativa da amostra.**

Mineral	Fórmula	Frações					
		-0,500 +0,250mm	-0,250 +0,150mm	-0,150 +0,075mm	-0,075 +0,062mm	-0,062 +0,045mm	-0,045mm
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X	X	X	X	X	X
Goethita	FeO(OH)		X	X	X	X	X
Dolomita	(Ca,Mg)CO <sub>3</sub>	X	X	X	X	X	X
Magnesita	MgCO <sub>3</sub>	X	X	X	X	X	X
Quartzo	SiO <sub>2</sub>		X		X	X	X
Calcita	CaCO <sub>3</sub>		X		X	X	X
Ankerita	Ca(Mg,Fe,Mn) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>				X	X	X
Clorita	(Mg,Al,Fe) <sub>12</sub> (Si, Al) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>16</sub>			X	X	X	X
Talco	Mg <sub>6</sub> (Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> )(OH) <sub>4</sub>	X	X	X	X	X	X
Caulinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>		X	X	X		X
Apatita	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F	X		X	X		
Pirolusita	MnO <sub>2</sub>				X	X	X
Gipsita	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O			X			

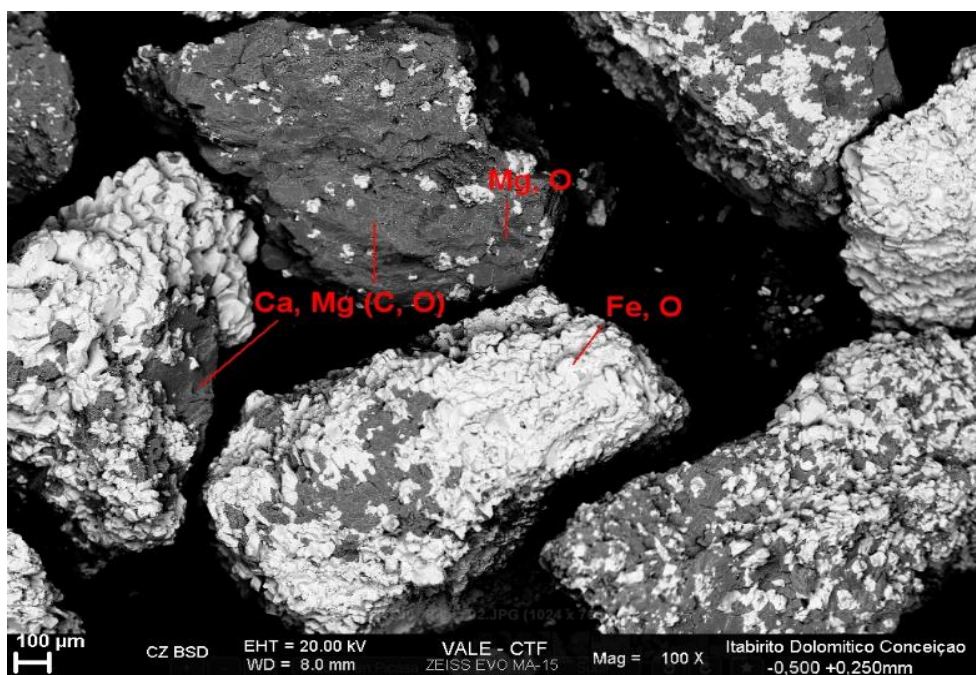


Figura 5.4 - Imagem geral – fração -0,500+0,250mm (100x).

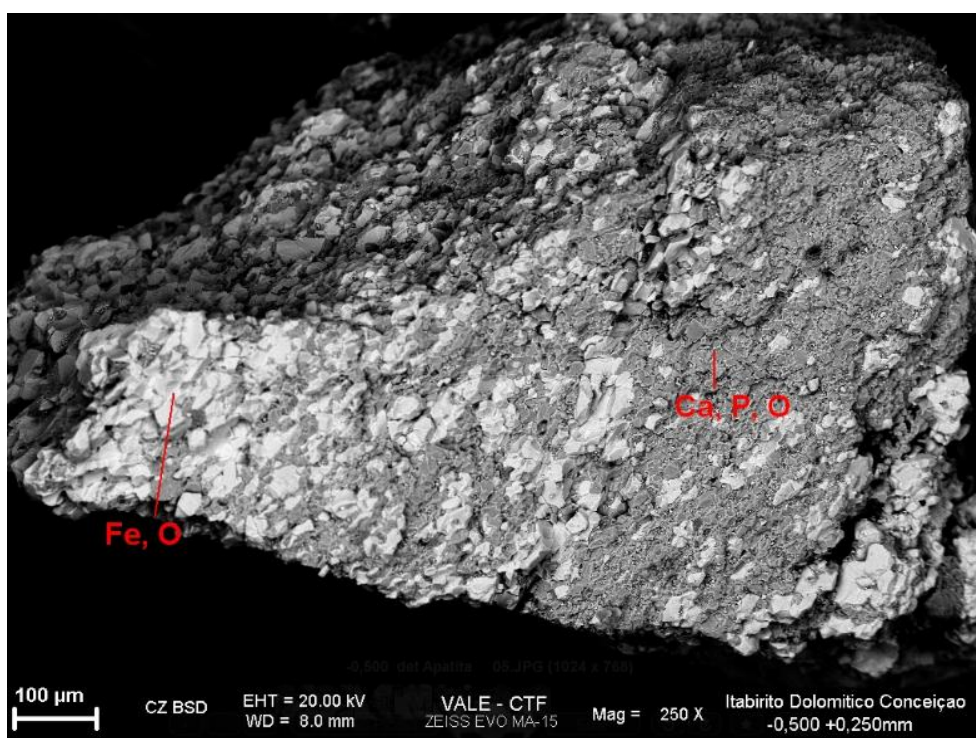


Figura 5.5 - Imagem com apatita – fração -0,500 +0,250mm (250x).



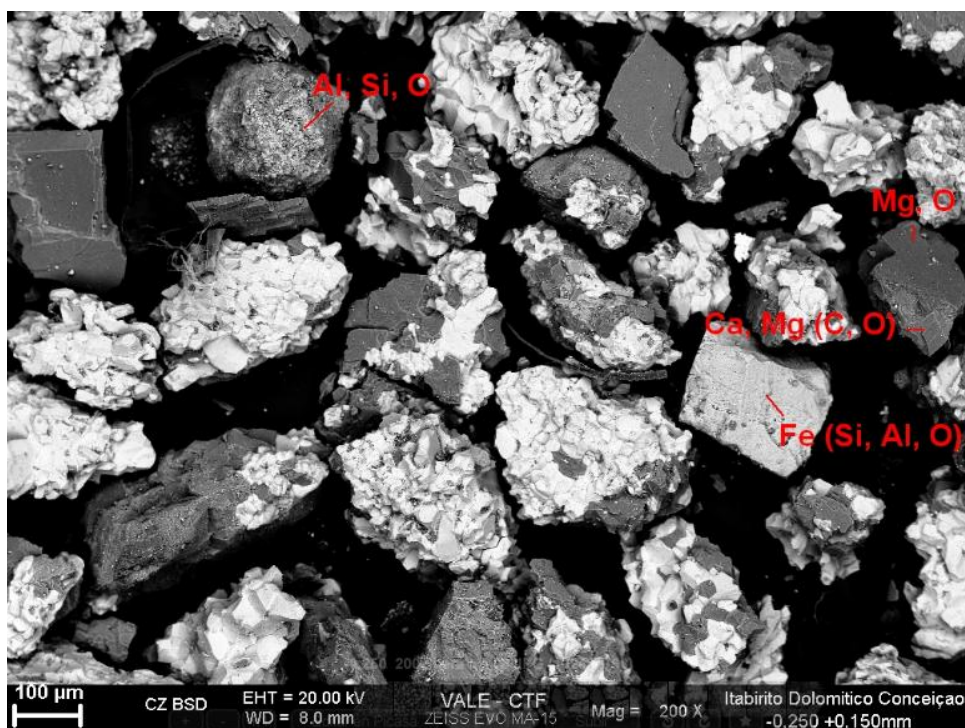


Figura 5.6 - Imagem geral – fração -0,250 +0,150mm (200x).

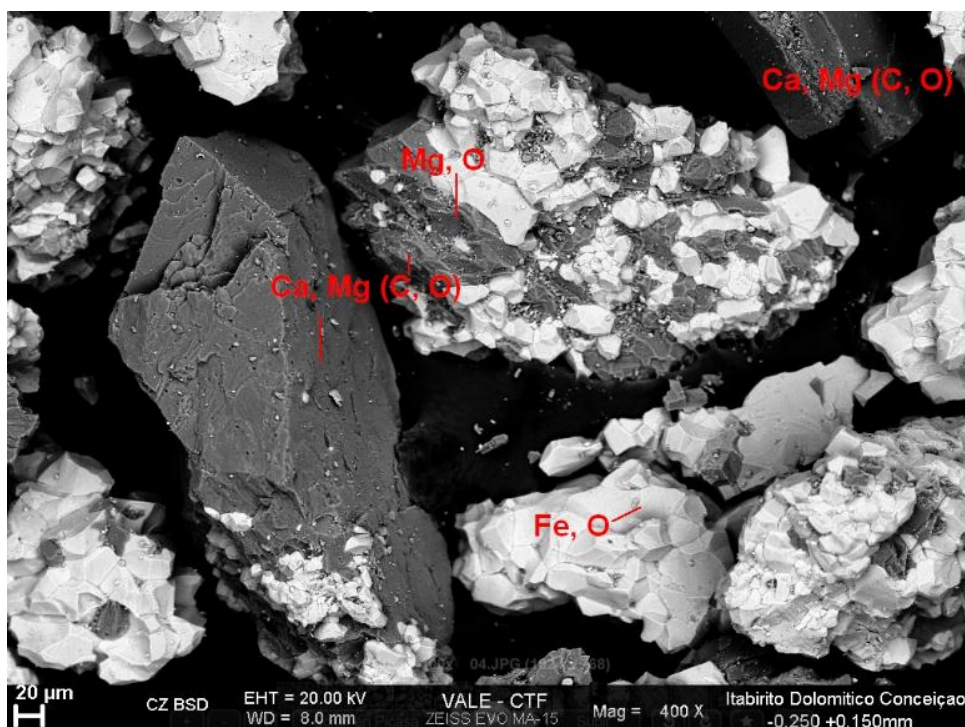


Figura 5.7 - Imagem geral – fração -0,250 +0,150mm (400x).

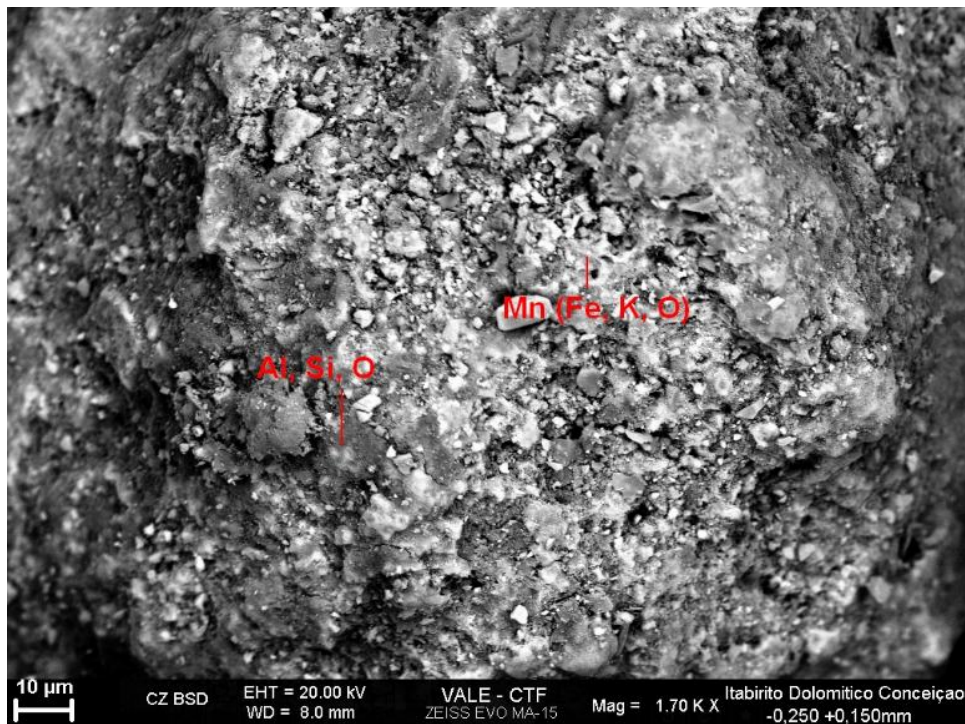


Figura 5.8 - Imagem com caulinita – fração -0,250 +0,150mm (1700x) .

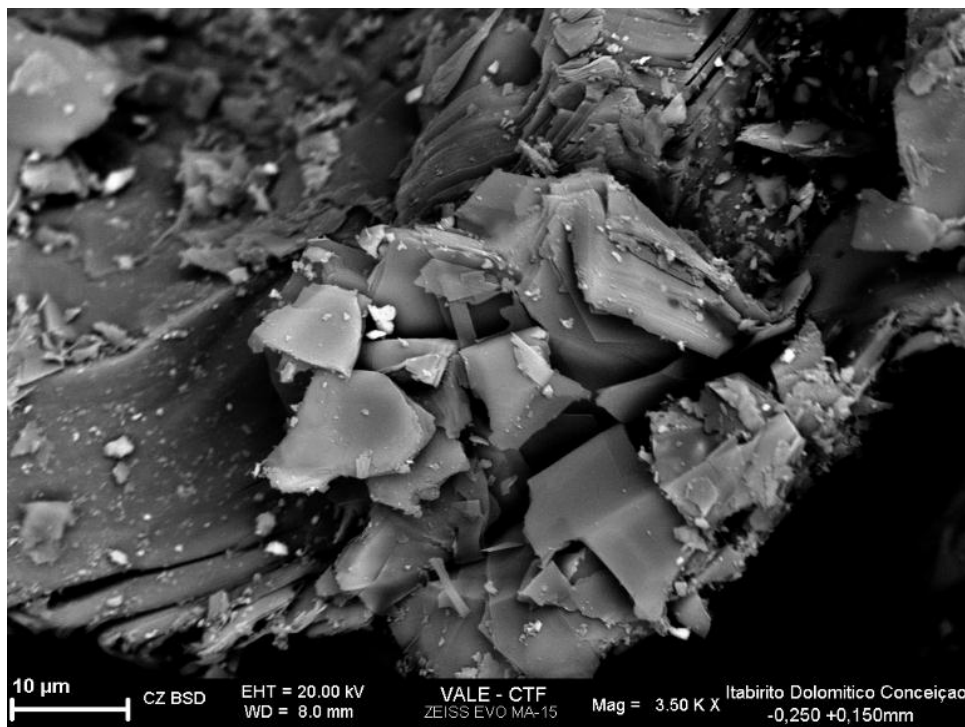


Figura 5.9 - Imagem com talco – fração -0,250 +0,150mm (3500x).



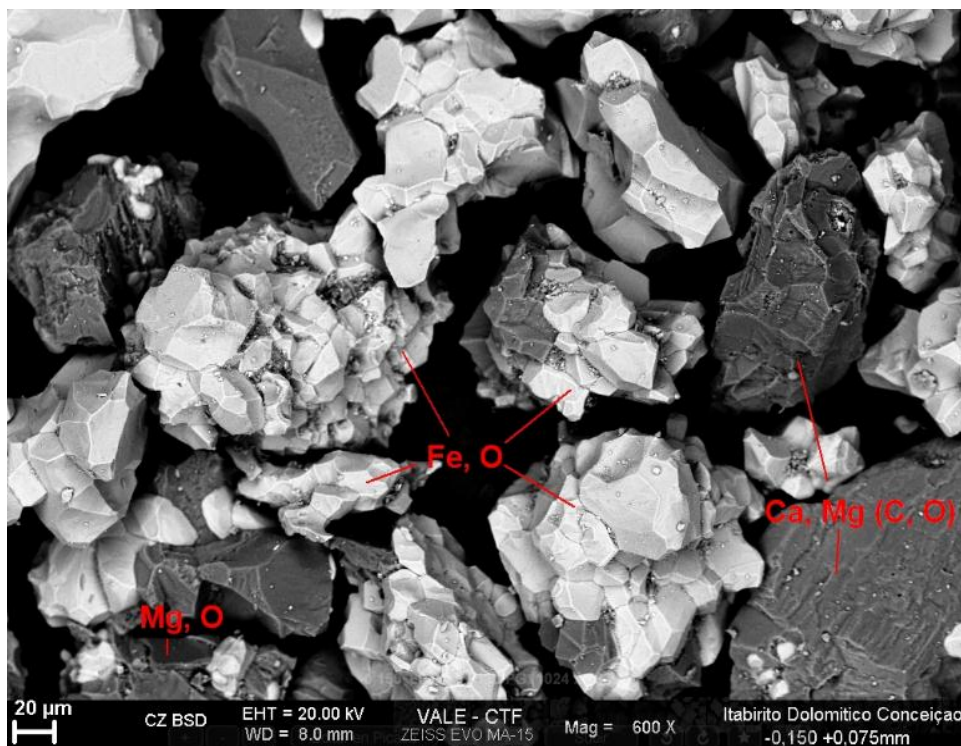


Figura 5.10 - Imagem geral – fração -0,150 +0,075mm (600x).

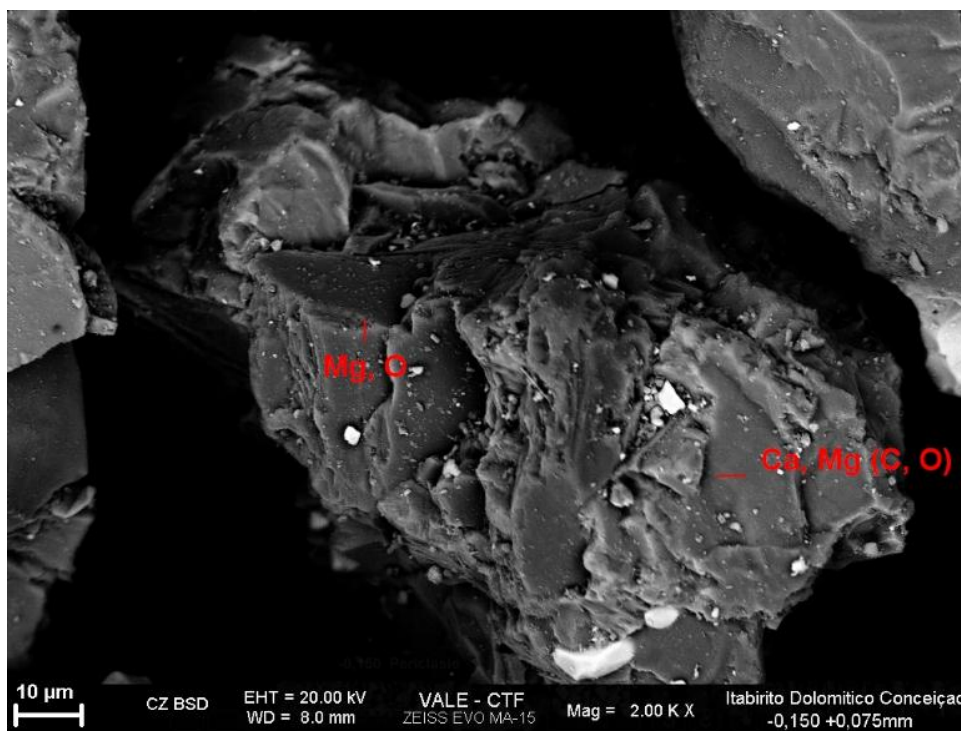


Figura 5.11 - Imagem com magnesita – fração -0,150 +0,075mm (2000x).



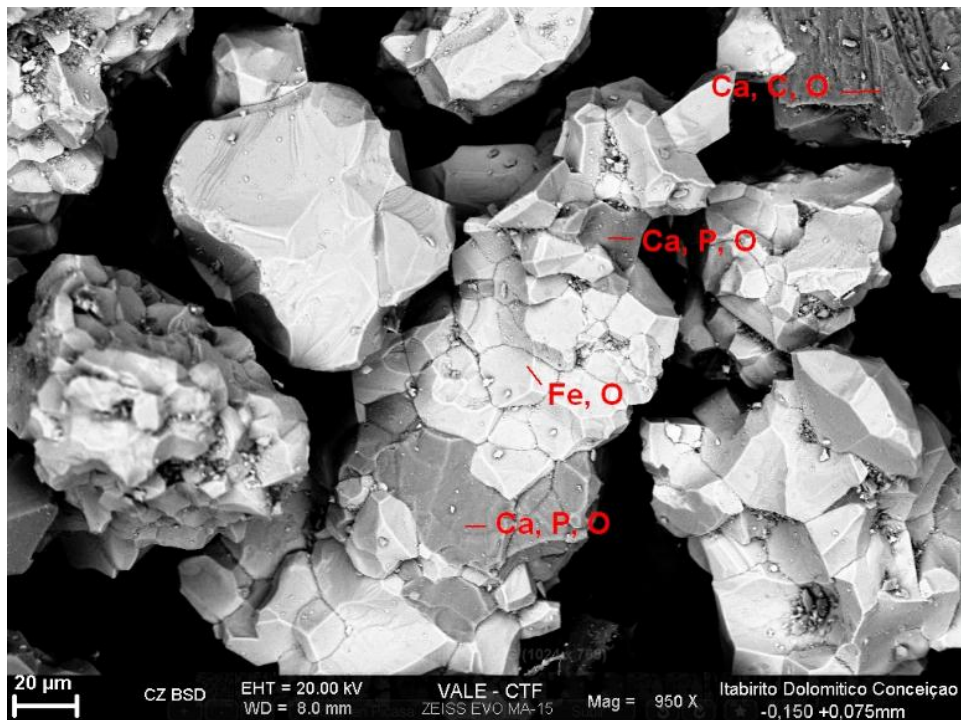


Figura 5.12 - Imagem geral – fração -0,150 +0,075mm (950x).

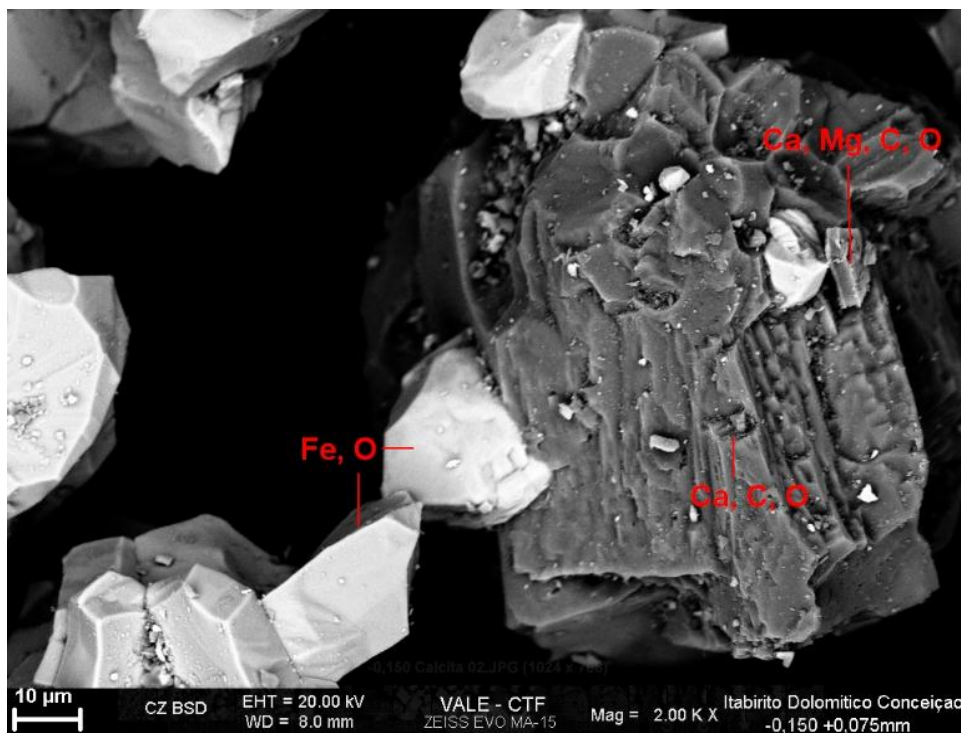


Figura 5.13 - Imagem com calcita – fração -0,150+0,075mm (2000x).



Figura 5.14 - Imagem com gipsita – fração -0,150 +0,075mm (3500x).

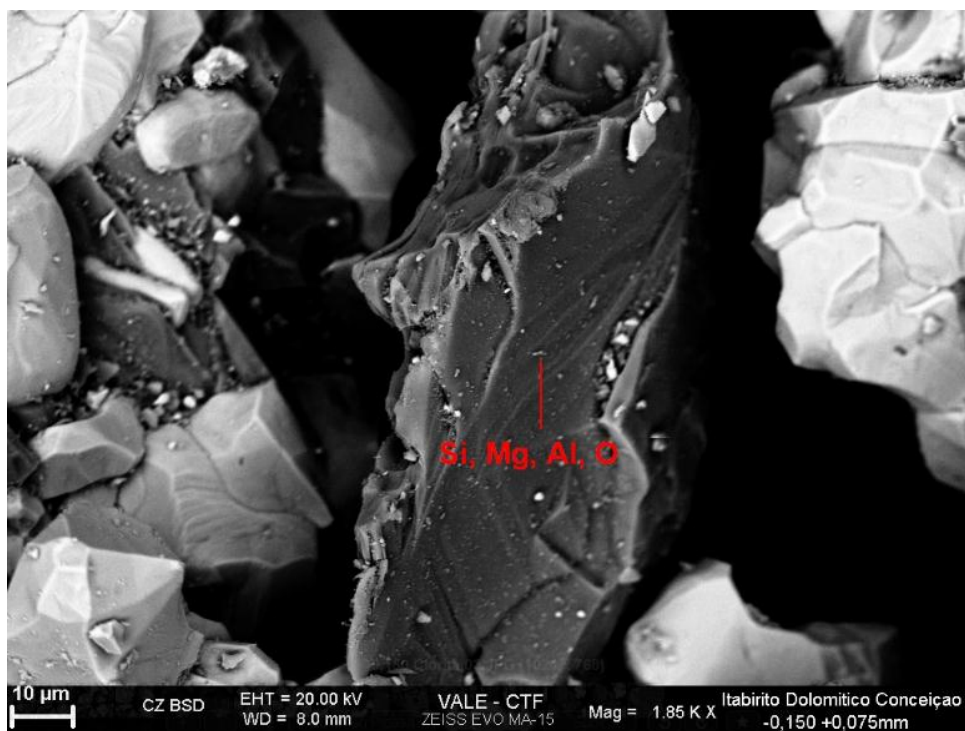


Figura 5.15 - Imagem com clorita – fração -0,150 +0,075mm (1850x).



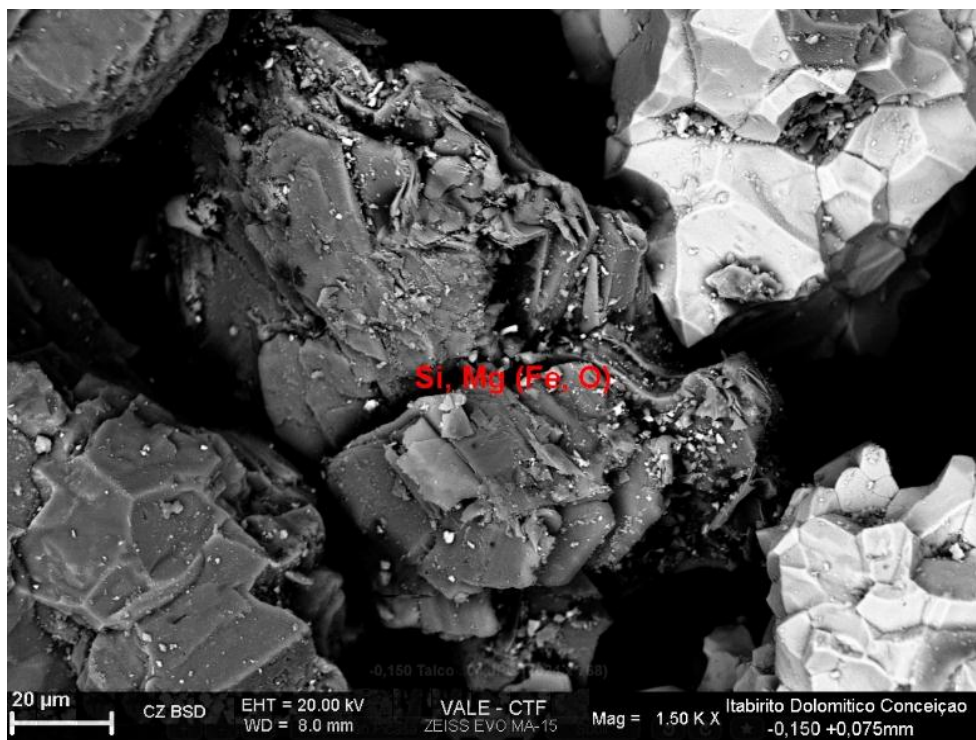


Figura 5.16 - Imagem com talco – fração -0,150 +0,075mm (1500x).

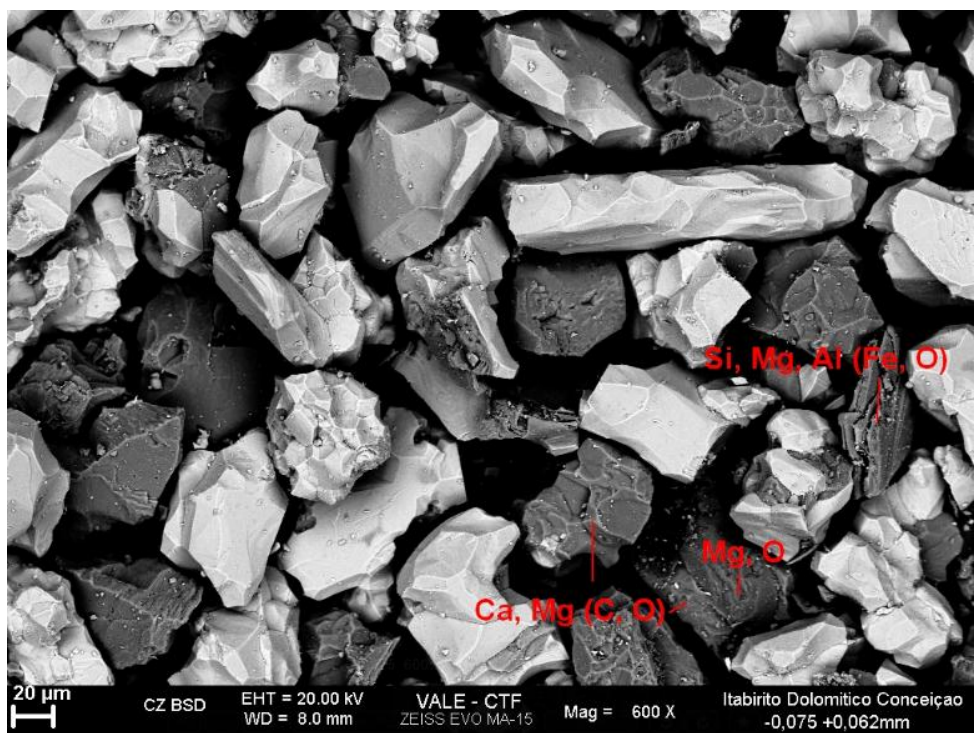


Figura 5.17 - Imagem geral – fração -0,075 +0,062mm (600x).

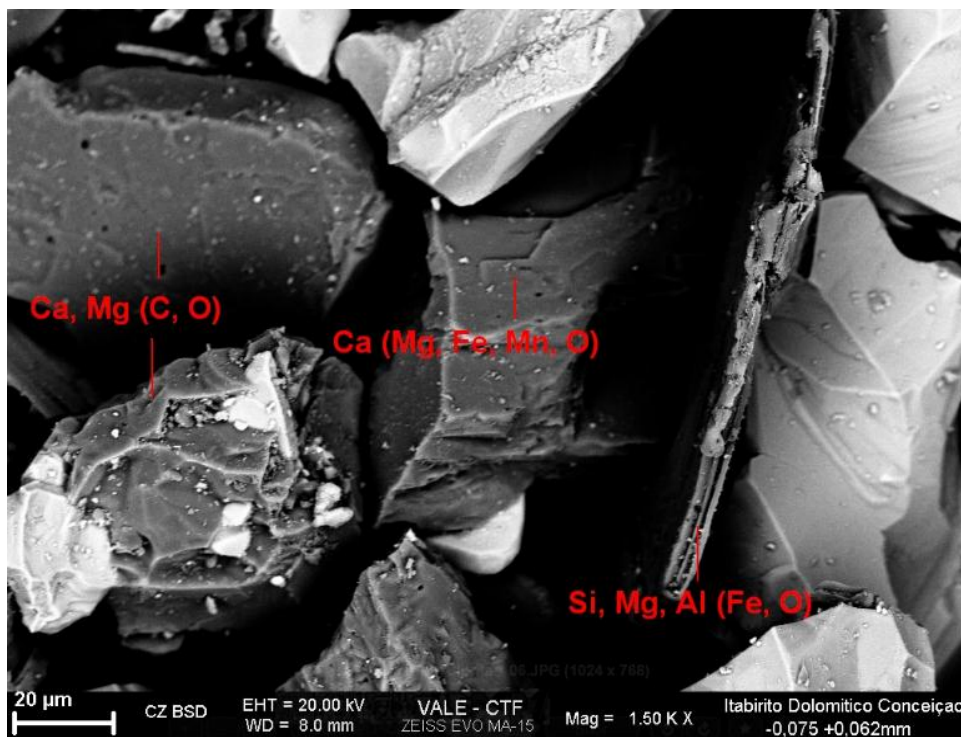


Figura 5.18 - Imagem com ankerita, dolomita e clorita – fração -0,075 +0,062mm (1500x).

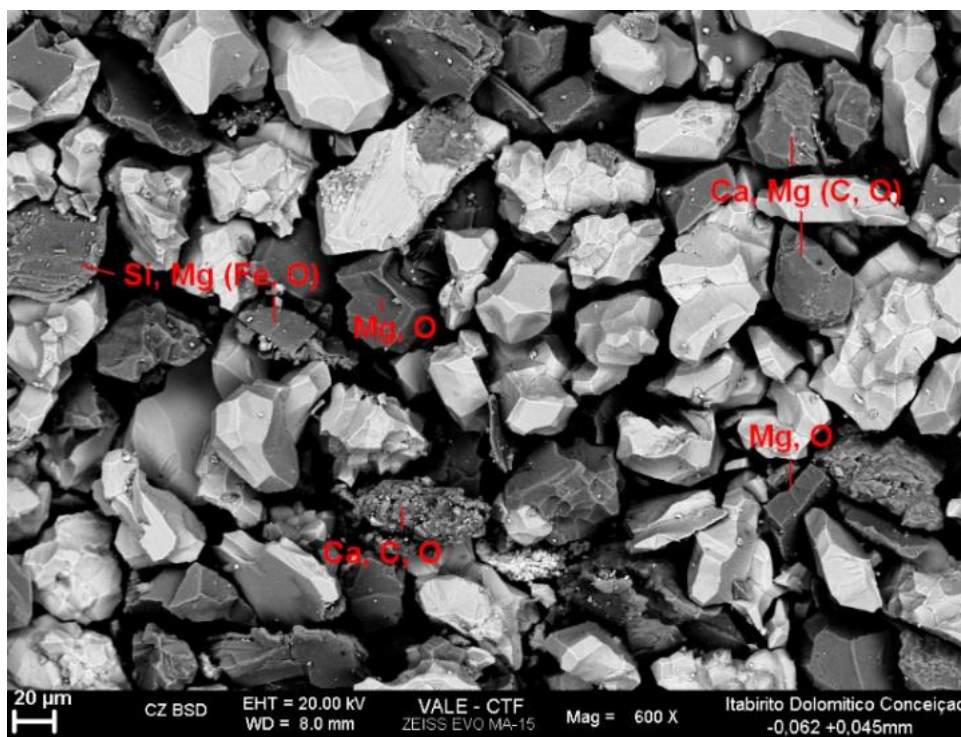


Figura 5.19 - Imagem geral – fração -0,062 +0,045mm (600x).

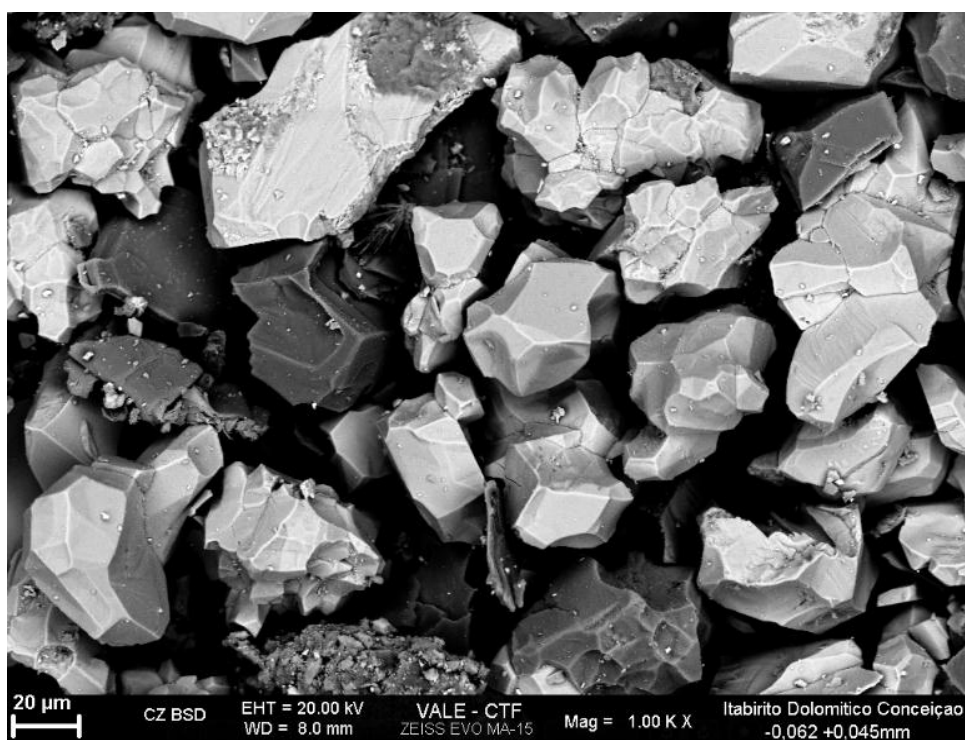


Figura 5.20 - Imagem geral – fração -0,062 +0,045mm (1000x).

### 5.7.2 Microscopia Óptica

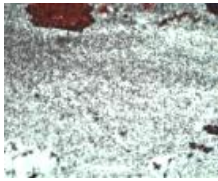

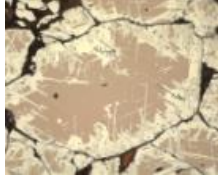

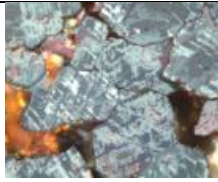

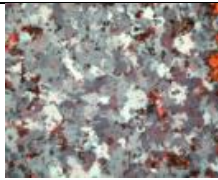

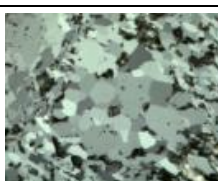
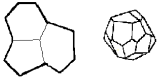
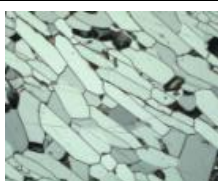
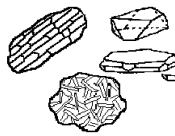
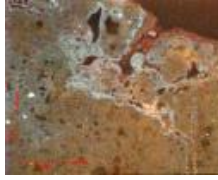
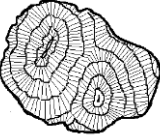
Para a realização da caracterização mineralógica foram confeccionadas seções polidas do material britado abaixo de 1mm com o sistema semiautomático da Struers Tegra Force 3.

A classificação dos tipos morfológicos dos óxidos/hidróxidos de Fe seguiu nomenclatura e metodologia desenvolvida na Vale S. A. para caracterização de produtos ferrosos, segundo quadro explicativo na Tabela 5.12.

Os aspectos microestruturais qualitativos e semiquantitativos estão sumariados nas Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15.



**Tabela 5.12 - Quadro ilustrativo dos principais tipos mineralógicos e morfológicos de óxidos/ hidróxidos de ferro.**

TIPO	CARACTERÍSTICAS	FORMA/ TEXTURA	ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA
<b>HEMATITA MICRO CRISTALINA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Cristais muito pequenos, &lt;0.01mm.</li> <li>♦ Textura porosa.</li> <li>♦ Contatos pouco desenvolvidos.</li> </ul>		
<b>MAGNETITA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Cristais euédricos, isolados ou em agregados.</li> <li>♦ Cristais compactos.</li> </ul>		
<b>MARTITA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Hematita com hábito de magnetita.</li> <li>♦ Oxidação segundo os planos cristalográficos da magnetita.</li> <li>♦ Geralmente porosa.</li> </ul>		
<b>HEMATITA LOBULAR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Formatos irregulares inequidimensionais</li> <li>♦ Contatos irregulares, geralmente imbricados.</li> </ul>		
<b>HEMATITA GRANULAR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Formatos regulares equidimensionais.</li> <li>♦ Contatos retilíneos e junções triplíceis.</li> <li>♦ Cristais compactos.</li> </ul>		
<b>HEMATITA LAMELAR (especular inclusive)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Cristais inequidimensionais, hábito tabular</li> <li>♦ Contatos retilíneos</li> <li>♦ Cristais compactos</li> </ul>		
<b>HIDRÓXIDOS DE FERRO (Goethita-Limonita)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Material amorfo e/ou criptocristalino.</li> <li>♦ Estrutura colóide, hábito botrioidal</li> <li>♦ Textura porosa</li> </ul>		

A quantificação dos minerais foi realizada por estimativa visual campo a campo e os dados obtidos em área foram ponderados para massa, considerando a densidade teórica de cada fase. O resultado da estimativa visual foi confrontado com o resultado da quantificação mineral por análise de imagens de mosaicos capturados no microscópio Nikon, modelo Eclipse DM ME600. A quantificação das fases foi feita pelo método de análise de imagens, com rotina específica desenvolvida no software da Zeiss Axiovision 4.8.

**Tabela 5.13 - Mineralogia com % estimada em massa.**

**Minerais metálicos**

Hematita	70%
Goethita/Limonita	r
Magnetita	-
Óxidos de Mn	rr

**Minerais transparentes**

Carbonato	30%
Talco	rr

Legenda: t(trazo): minerais pouco abaixo de 1%.

r (raro): minerais em torno de 0,5%.

rr (muito raro): minerais muito eventuais abaixo de 0,2%.

**Tabela 5.14 - Tipos morfológicos dos grãos de óxidos/ hidróxidos de ferro (em %).**

**Óxidos de Fe**

<b>Hematita Total</b>	<b>100%</b>
Hematita Microcristalina	r
Hematita Martita	-
Hematita Lobular	30%
Hematita Granular	46%
Hematita Lamelar/ Acicular	24%
Magnetita	-

**Hidróxidos de Fe**

<b>Hidróxidos Total</b>	<b>r</b>
Goethita/Limonita	r
Argilomineral limonítico	-



**Tabela 5.15 - Granulação dos grãos de óxidos/ hidróxidos de ferro (em %).**

Muito fina <0,01mm	r
Fina 0,01 a 0,03 mm	29%
Média 0,04 a 0,11 mm	68%
Grossa 0,12 a 0,22 mm	2%
Muito grossa >0,22 mm	t
<b>Tamanho médio (mm)</b>	<b>0,06</b>

As figuras 5.21 e 5.22 apresentam mosaicos das partículas analisadas por análise automatizada de imagens. Cada mosaico foi composto por 20 imagens capturadas com objetiva de 20x. A hematita apresenta-se em cor branca, o carbonato cinza claro, a resina em cinza escuro e os poros em preto.

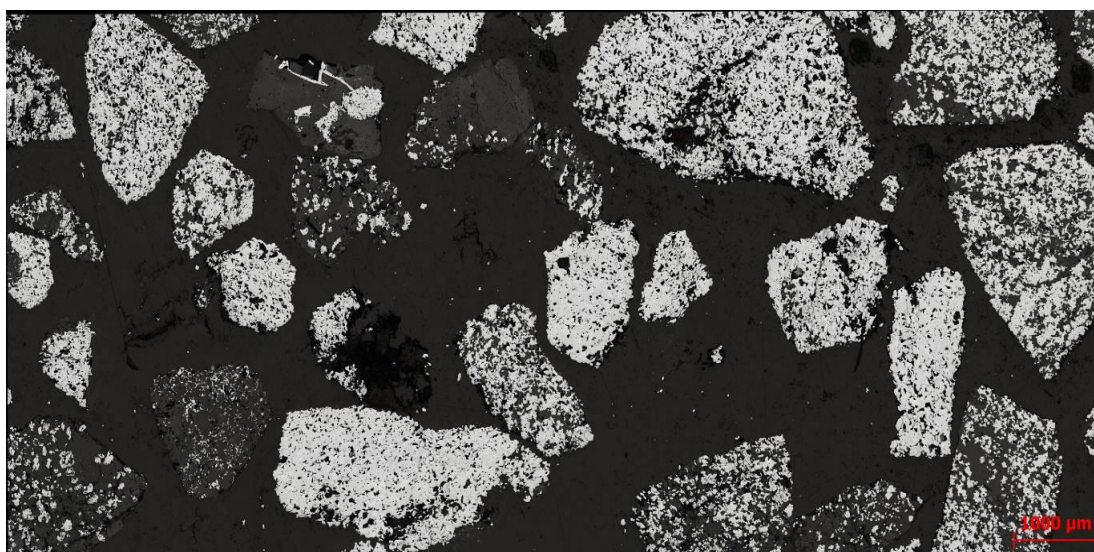


Figura 5.21 - Mosaico 1 – 20x.

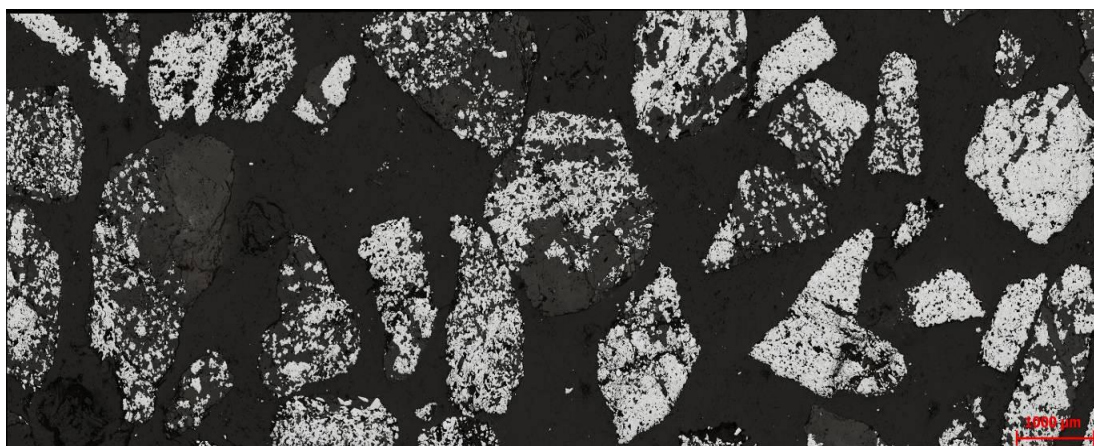


Figura 5.22 - Mosaico 2 – 20x.

### 5.7.3 Difractometria de raios-X

As amostras foram divididas em duas partes para análise e análise repetição. Foram prensadas e analisadas no difratômetro de raios-X – Rigaku (MiniFlex). As fases mineralógicas foram identificadas e interpretadas pelo software Jade. A sugestão de proporção relativa dos minerais foi baseada na altura relativa dos picos principais das fases presentes, que pode sofrer interferência da cristalinidade das fases e/ou efeito de textura.

De um modo geral, as amostras apresentam uma constituição mineralógica bastante similar, com predominância da fase hematita (fase majoritária). Além da hematita, foram identificadas as fases dolomita e magnesita (fases secundárias). Entretanto, a magnesita pode ser considerada como fase minoritária na análise repetição da amostra de itabirito dolomítico, por estar presente em menor proporção se comparada à amostra de itabirito dolomítico.

**Tabela 5.16** - Mineralogia qualitativa das amostras de itabirito dolomítico e itabirito dolomítico repetição.

Mineral	Fórmula Teórica	Itabirito dolomítico	Itabirito dolomítico repetição
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	M	M
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	S	S
Magnesita	$\text{MgCO}_3$	S	m

Legenda: M: majoritária S: secundária m: minoritária

## 6 CONCLUSÕES

Comprova-se que, cada vez mais, torna-se importante a caracterização mineral e tecnológica do minério de ferro, devido ao seu efeito na produtividade nos processos siderúrgicos ocasionados pela composição mineralógica e morfológica, porosidade, índice de tamboramento, índice de crepitação e índice de degradação sob redução estática e outros parâmetros.

### *Fração Granulado*

A fração granulado (-32,00 +8,00mm) apresenta boa qualidade química, com baixos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Apresenta excelente resistência ao tamboramento e baixos níveis de crepitação. O RDI é alto em comparação aos outros granulados produzidos nas minas de Minas Gerais.

Em participações moderadas, espera-se que adições dos granulados dolomíticos na carga metálica de altos fornos em substituição parcial ao calcário dolomítico, não vá comprometer a sua utilização.

### *Fração fina: sinter feed e pellet feed*

O resumo da granulometria da fração sinter feed e pellet feed (-8,0mm) indica:

- o percentual de lama do material é baixo (4,58%);
- a lama tem altos teores de MgO associados a elevados teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , P;
- 51,66% da amostra estão na fração pellet feed sem lama.

Há grande possibilidade dos produtos originados a partir dos minérios dolomíticos virem a compor o catálogo de produtos da Vale S.A., dependendo das características avaliadas nos testes como matéria prima e seu uso em siderurgia e pelotização.

Existem aplicações potenciais para uso de minério dolomítico, não só na siderurgia, mas também nas plantas de pelletização da Vale. Mas, para isso, o material deve apresentar, além de bom desempenho nos processos de aglomeração, baixos teores de P e  $Al_2O_3$ , baixa variabilidade química e uma produção estável no longo prazo, que viabilizem seu uso em substituição parcial aos fundentes atualmente utilizados.

## **7 RELEVÂNCIA**

Este trabalho contribui para o aumento do grau de conhecimento sobre as possíveis rotas para aproveitamento de minérios dolomíticos, evitando desta forma a necessidade de novas licenças ambientais para instalação e operação de novas pilhas que estão cada vez mais difíceis e exigindo projetos de baixo custo de operação e alta rentabilidade. O aproveitamento do itabirito dolomítico como minério pode aumentar as reservas e garantir sustentabilidade a longo prazo, bem como reduzir a relação estéril/minério e conseqüentemente o custo unitário de lavra.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho busca trazer mais conhecimento a um tipo de ocorrência mineral abundante no Quadrilátero Ferrífero, que atualmente não tem sido aproveitada.

O aproveitamento do itabirito dolomítico como minério deve ser avaliado como matéria prima na composição de carga de altos-fornos e na composição dos diversos tipos de pellets feeds e pelotas.

Para as frações de PF (pellet feed) natural e -8,0mm, deve-se compor simulações para a incorporação ao pellet feed visando a produção de pelotas.

As frações -32,0+8,0mm devem simular a substituição de parte das pelotas padrão Vale S. A., visando verificar os ganhos comparativamente ao uso de calcário.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. de, (1977). O Cráton de São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7:349-364.

BABINSKI, M., CHEMALE JR., F., SCHUMUS, W.R. (1995). The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil, Precambrian Research, 72, p.235-245.

CARNEIRO, M., NOCE, C.M., TEIXEIRA, W. (1995). Evolução policíclica do Quadrilátero Ferrífero: uma análise fundamentada no conhecimento atual da geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm-Nd. Rev. Escola de Minas, 48(4), p.264-273.

CHEMALE JR., F., QUADE, H. (1986). Estratigrafia e geologia estrutural do Distrito Ferrífero de Itabira, Minas Gerais. Anais XXXIV Congr. Bras. Geol. Goiânia, Goiás. vol. 2. p.987-998.

CHEMALE JR., F., QUADE, H., CARBONARI, F.S. (1987). Economic and structural geology of the Itabira iron ore district, Minas Gerais. Brazil. Zbl. Geol. Palaont. Teil I. p.743-752.

DERBY, O. A., (1906). The Serra of Espinhaço. Journ. Geol. V.14. p.374-401.

DORR II, J.V.N., BARBOSA, A.L.M. (1963). Geology and ore deposits of the Itabira District, Brazil. Geological Survey Professional Paper 341C.

DUTRA, F., PORFIRO, D., (2010). Avaliação de itabiritos dolomíticos de Conceição e Capão Xavier. Relatório interno da Vale S.A. Belo Horizonte.

ENDO, I., Silva, A., Mariano, D., Espinoza, R., Lopes, A., Angeli, G. (2008). Estratigrafia e Arcabouço Estrutural de Brucutu e Dois Irmãos, Quadrilátero Ferrífero, MG. Relatório Interno. VALE/UFOP. 54p.

FERRAN, A.P.N., A Mineração e a flotação no Brasil – Uma perspectiva histórica , DNPM -2009.

FRICK, M.A. (2008) Caracterização do minério de ferro por visão computacional. Universidade Federal de Santa Maria /Centro de Tecnologia. Dissertação de mestrado. Santa Maria.

GALBIATTI, H.F. (2006). Ruptura oblíqua condicionada por falha transcorrente na cava a céu aberto da mina do Cauê, Itabira, MG. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Ouro Preto.

GUIMARÃES, M.L.V. (2007). Avaliação de recursos de minério de ferro – Mina de Conceição /Quadrilátero Ferrífero-MG. Relatório interno da Vale S.A. Belo Horizonte.

GUIMARÃES, M.L.V., Fujikawa, L.H., Vieira, M.B.H., (1999). Classificação de Minérios de Ferro. II Simp. Bras. de Minério de Ferro. Ouro Preto.

HASUI, Y, Magalhães, A.C. (1998). Mapeamento geoestrutural da região do complexo minerador de Itabira – MG. 71p. Relatório Interno de Vale S.A..

JESUS, C. A. G., (2012) Sumário Mineral de 2012 – Ferro. DNPM- Ministério de Minas e Energia, Governo do Brasil.

LEAH, Mach CPG, (2008). Relatório Técnico NI 43-101. Projeto de Ferro Minas-Rio/MMX Mineração e Metálicos S.A.

LIMA, M.A.R., (2003). Indústria Extrativa Mineral. Cap.4. p.303-36.

MACHADO, M.L.P., (2006). Siderurgia – da matéria prima ao aço laminado. Coordenadoria de Engenharia Metalúrgica–UFF/RJ.

NEUMANN, R., Scheneider, C.L., Neto, A.A., (2004) Caracterização Tecnológica de Minérios – Tratamento de minérios, p.55-109. CETEM/Rio de Janeiro.

PIRES, F.R.M. (1979). Structural Geology and Stratigraphy at the Junction of the Curral Anticline and the Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Michigan. 220p. (Ph.D. Dissertation, Michigan Technological University).



QUARESMA, L.P., Balanço Mineral Brasileiro(2001). DNPM- Ministério de Minas e Energia,Governo do Brasil.

RAPOSO, F.O. (1996). Formações ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do Quadrilátero Ferrífero e suas relações com níveis rudáceos. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

ROSIERE, C. A., Chemale, F. Jr., Vanucci, L. C., Guimarães, M. L. V.,Santana, F. C. & Carmo Jr. J. A. (1997). A estrutura do Sinclínório de Itabira e a tectônica transcorrente do NE do Quadrilátero Ferrífero. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 6, Pirenópolis.

SANTOS, L.D., BRANDÃO, P.R.G. (2001). Caracterização mineralógica de minérios de ferro enfatizando a determinação de fases aluminosas. Metalurgia & Materiais, Caderno Tecnológico, Tecnologia Mineral no.1, publicado por Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), São Paulo, vol.58, no.519, março 2002, p.12-17.

SOUZA, R.S.(2007). Excursão virtual pela Estrada Real no Quadrilátero Ferrífero- Aspectos geológicos,históricos e turísticos. CPRM- Serviço Geológico do Brasil.

SUSAKI, K.,(2009). Fundentes e escorificantes. Centro de Gestão de Estudos Estratégicos/ABM,25p.

VIEIRA, A.C., (2013), Instituto Aço Brasil. Disponível em: <http://www.acobrasil.or.br/site/português>. Acesso pagina web em 28 de fevereiro 2013.

## **10 DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR**

Júlio César Versiani Costa nasceu em 28 de fevereiro de 1960 em Juiz de Fora- MG, filho de Antônio Costa e Margarida Versiani Costa.

Graduou-se em Engenharia Geológica pela UFOP em agosto de 1989.

Trabalhou nas minas de ferro de Córrego de Meio, Alegria, Fábrica Nova , Brucutu e Cauê, todas em Minas Gerais.

Atualmente trabalha na Mina de Fosfatos Bayóvar, no Peru.