

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOMETALÚRGICA DOS
PRINCIPAIS MINÉRIOS DE FERRO BRASILEIROS –
FRAÇÃO *SINTER FEED***

LUCY TAKEHARA

ORIENTADOR: Farid Chemale Jr.

BANCA EXAMINADORA: Prof. Dr. Antônio C. F. Vilela (UFRGS)

Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira (UFOP)

Eng. Dr. Luís A. M. Scudeller (USIMINAS)

**Tese de Doutorado apresentada
como requisito parcial para
obtenção do Título de Doutor em
Geociências.**

Porto Alegre – 2004

Takehara, Lucy

Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração Sinter Feed. / Lucy Takehara. - Porto Alegre : UFRGS, 2004.

[403 f.]. il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, RS - BR, 2004.

1. Geoquímica. 2. Minério de Ferro. 3. Processo de Sinterização. 4. Caracterização Geometalúrgica. I. Título.

Catálogo na Publicação

Biblioteca do Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grün CRB10/1113

Aos meus filhos: Iara, Yuri e Yasmin, que sempre busquem
enfrentar todos os obstáculos com serenidade e bravura.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho só foi possível de ser realizado devido a colaboração e contribuição de muitas empresas e pessoas, as quais gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos:

- À USIMINAS, gerência e funcionários do Centro de Pesquisas Tecnológicas, pela realização dos testes de microaglomeração, sinterização e qualidade do sinteres gerados;
- Ao Eng. Hamilton Pimenta pelo entusiasmo e dedicação à execução do projeto, bem como pelas discussões dos dados experimentais;
- Às minerações CVRD (Carajás); Córrego do Feijão, MBR (Minas de Águas Claras, Mutuca, Pico e Tamanduá), SAMITRI e SAMARCO, através de suas gerências de minas e geólogos; por terem cedido vossos minérios, sem os quais esse trabalho não poderia ser realizado;
- Ao CNPq pelo investimento feito em mim, durante o período na qual fui bolsista de doutorado;
- Ao prof. Dr. Carlos Alberto Rosière (UFMG) e prof. Dr. Cláudio Batista Vieira (UFOP), pelo apoio, discussão e acompanhamento na fase inicial desse trabalho;
- À CPRM (Porto Alegre), por ter cedido seu laboratório de preparação de amostras para a confecção de minhas seções polidas, um agradecimento especial ao Valmor que me auxiliou bastante;

- À amiga Janaína Nunes Ávila, pela ajuda tanto na confecção das figuras quanto nos problemas computacionais, sempre prestativa e solidária.
- Ao Guilherme Mallmann na confecção das figuras do exame de qualificação e sempre que possível auxiliou-me quando foi preciso;
- Aos meus filhos pela compreensão e dedicação que apoiaram o meu trabalho, foram motivações para seguir adiante, cuja paciência, atenção e confiança foram fundamentais;
- À Gilda Arruda, Lygia Chemale e Mayra Chemale, cujo apoio logístico foi fundamental para o término dessa jornada; e
- Finalmente, ao Farid, marido e orientador, apesar de não ser uma conjugação sempre positiva, mostrou ser possível à conjugação desses dois papéis e trabalharmos juntos, sem grandes problemas.

RESUMO

Estudos de sinterização em minérios geológicos brasileiros são desenvolvidos, neste trabalho, para caracterizar as suas melhores relações geológicas e metalúrgicas.

Foram escolhidos seis tipos de minérios de ferro geológicos, que normalmente compõem os minérios blendados (metalúrgicos) utilizados na siderurgia, provenientes de diferentes minas de ferro brasileiras: (i) três tipos de minérios hematíticos, diferenciados por tamanho e arranjo (trama) dos cristais de minerais de ferro e grau de cristalização; (ii) três tipos de minérios hematíticos hidratados, diferenciados por tamanho e arranjo (trama) dos cristais de minerais de ferro, grau de cristalização e hidratação diferenciadas, com maior ou menor presença de magnetita.

Os minérios foram caracterizados segundo os critérios geológicos, com base na composição mineralógica e química, textura, estrutura, grau de alongação e arredondamento e superfície de contorno das partículas primárias de cada subfração.

Os ensaios de sinterização foram realizados com a definição de 19 (dezenove) níveis de queima representados por minérios: blendado (os seis tipos de minérios em igual proporção), os seis tipos de minérios em três subfrações diferentes (nucleantes, intermediárias e aderentes). Esses 19 níveis de queima foram submetidos aos processos de microaglomeração e sinterização e aos testes de qualidade mecânicos e metalúrgicos do sinteres gerados.

No processo de microaglomeração, observou-se que os minérios hematíticos apresentam crescimento das micropelotas acima da média, em todas

as subfrações estudadas; enquanto que os minérios hematíticos hidratados têm crescimento abaixo da média, com exceção do minério GI 0166 na sua subfração aderente, foi a mistura que apresentou o maior crescimento.

O tipo de superfície apresentado pelo minério possibilita maior ou menor aderência das partículas mais finas. Partículas primárias nucleantes com partículas finas aderidas em uma superfície com rugosidade baixa, não permitem bom crescimento de suas micropelotas. Se essas superfícies forem lisas com reentrâncias maiores e angulares, sem finos aderidos, ocorre um bom crescimento de suas micropelotas.

Os testes de sinterização mostram que os minérios hematíticos são mais produtivos, mas geram maior quantidade de finos de retorno que os minérios hematíticos hidratados. Os níveis de queima que apresentaram bons resultados no processo de microaglomeração, não necessariamente, tiveram bom desempenho no processo de sinterização. Nos testes de qualidade do sinter, observa-se que os minérios hematíticos comportam-se melhor nos testes de resistência e metalúrgicos. Dentre os minérios hematíticos, aqueles menos deformados (gerados em condições geológicas de baixa temperatura e pressão) apresentam desempenho nos testes realizados acima da média, destacando-se com os melhores resultados nos testes de RDI, redutibilidade e testes de tamboramento. Isso ocorre devido ao tipo de hematita presente e à sua textura, permitindo que a frente de combustão e a temperatura sejam mais homogêneas.

Minérios hematíticos hidratados mostraram comportamento abaixo do esperado em quase todas subfrações dos minérios estudados. Podem ser destacados alguns comportamentos positivos: melhor teste de queda de todos os níveis do minério GI0358, na subfração aderente; melhor microaglomeração do minério GI 0166 na sua subfração aderente; boa redutibilidade do minério HI 0348 na subfração nucleante.

Conclui-se que os minérios estudados apresentam características bastante diferenciadas quando observadas sob o enfoque geológico e que, por sua parte, são responsáveis pelos resultados obtidos nos processos e testes de sinterização realizados. Em adição, foi possível caracterizar os minérios geológicos com o melhor comportamento nas subfrações nucleante, aderente e intermediária. A mistura sugerida pode gerar produtos sinter de boa qualidade em escala industrial, otimizando os custos na siderurgia.

ABSTRACT

Sintering studies of Brazilian geological iron were developed in this thesis. The geologic characteristic of iron ores and the metallurgical results of the sinter product are herein integrated.

Usually, the iron ore used in the steel industry is a product of blending of different geological ores. In order to understand better the behavior of sinterfeed, six principal geologic types of different Brazilian iron mines have been chosen for this work. They are (i) three types of hematitic ores, differenced by crystallization grade, size and fabric of iron minerals; and (ii) three types of hydrated hematitic ores, differenced by crystallization grade, size and fabric of iron minerals, hydrated minerals and magnetite presence. The characterization of ores is after geologic criteria, such as mineralogical and chemical composition, texture, microstructures, elongation and roundness grade and roughness of the surface of primary particles of each sinter feed fraction.

The sintering studies carried out in nineteen mixtures, represented by the blended ore (mixture of the six chosen ores) and the six types of ores in their three fractions, nuclei, adhering and intermediate ones. Micropelleting and sintering processes in nineteen mixtures were completed as well as the sinter product was tested for mechanical and metallurgical characteristics.

In the micropelleting process was observed that the pellet growth of the hematitic iron ores was mostly higher than hydrated hematitic ores. Only the GI 0166, hydrate hematitic ore, in the adhering fraction, had better result with highest growth of all mixtures.

The surface shape presented by the nuclei particles influences the adhering particle index. Nuclei particles, which have fine particles on its smooth irregular surface, do not have good micropellet growth. Otherwise, the ores, that have a clean surface with deep and sharp reentrances, have better micropellet growth.

The sintering tests point to that hematitic ores are more yield, but produce also more return fines than hydrated hematitic ores. However the mixture that had a good behavior in the micropelleting process, could not always present good results on the sintering process. Hematitic ores have better behavior in the mechanical and metallurgical tests, because the micropellets are less deformable. The best results in the sinter quality tests are those with the iron low strain ore (affected by geological conditions of low T and P). These results may have relationship with the kind of hematite type and its texture, that enable similar (homogeneous) heating front and temperature .

Compared to the hematitic ores, the hydrated hematitic ones in the three fractions have bad performance. However, in some situations, these ores present better behavior, as follows: the GI0358 has the best shatter test index; the adhering fraction of GI 0166 has the best micropellets growth; and the nuclei fraction of the HI 0348 has good reductibility index.

The different geological characteristics presented by the studied iron ores are responsible for the obtained results in the sintering processes and tests. In addition to that, it was possible to characterize the geological iron ores, which had the best behavior with respect to their nuclei, adhering, and intermediate fractions. The ideal mixture must have contribution of two or more types of studied geological iron ores that it will result in a sinter with good quality, optimizing the process costs.

SUMÁRIO

Capa	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Sumário	ix
Sumário das Figuras	xv
Sumário das Tabelas	xxxv
Sumário dos Gráficos	xxix
Lista de Abreviaturas	xxxii
I – Introdução	001
I.1 – Objetivo	003
I.2 – Metodologia	005
I.2.1 – Preparação de Amostras	006
I.2.2 – Caracterização do Minério	009
I.2.3 – Condições para o Processo de Sinterização	015
I.2.3.1 – Testes de Sinterização	018
I.2.3.2 – Testes de Avaliação da Qualidade do Sinter	020
I.2.3.2.1 – Composição Química	021
I.2.3.2.2 – Caracterização Mineralógica e Microestrutural do	022
Sinter	
I.2.3.2.3 – Granulometria	022
I.2.3.2.4 – Caracterização Física	023
I.2.3.2.5 – Caracterização Metalúrgica	024
I.2.3.2.6 – Propriedades a Altas Temperaturas	025

II – Minério de Ferro	028
II.1 – Minerais de Ferro	029
II.2 – Minério de Ferro	032
II.2.1 – Minério de Ferro no Brasil	035
II.3 – Classificação e Preparação do Minério de Ferro	038
II.3.1 – Classificação do Minério de Ferro Metalúrgico	041
II.3.2 – Preparação do Minério de Ferro - Beneficiamento	042
II.4 – Considerações sobre o Minério de Ferro	044
III – Geologia	046
III.1 – Geologia do Quadrilátero Ferrífero	051
III.1.1 – Estruturação do Quadrilátero Ferrífero	054
III.1.2 – Tipos de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero	056
III.2 – Geologia da Serra dos Carajás	059
III.2.1 – Estruturação da Serra dos Carajás	062
III.2.2 – Tipos de Minérios da Serra dos Carajás	063
III.3 – Geologia das Minas de Minério de Ferro Estudadas	065
III.3.1 – Mina de Alegria	065
III.3.2 – Mina do Andrade	068
III.3.3 – Mina Córrego do Feijão	071
III.3.4 – Mina do Tamanduá	072
III.3.5 – Mina da Serra dos Carajás	074
IV – Processo de Sinterização	079
IV.1 – Breve Histórico da Siderurgia	080
IV.1.1 – Siderurgia no Brasil	084
IV.2 – Desenvolvimento do Processo de Sinterização	086
IV.2.1 – Minério de Ferro	093
IV.2.2 – Fundentes e Adições	098
IV.2.3 – Combustíveis	100
IV.2.4 – Operação de Sinterização	101
IV.3 – Eficiência dos Indicadores de Operação	103
IV.4 – Indicadores de Qualidade	104
V – Caracterização do Minério de Ferro	107

V.1 – Características dos Minérios de Ferro	109
V.2 – Abordagem Geometalúrgica	114
VI – Descrição dos Minérios	118
VI.1 – Minério GI 0137	120
VI.1.1 – Descrição dos Fragmento	120
VI.1.2 – Descrição Mineralógica	122
VI.1.3 – Caracterização das Frações de Sinter Feed	123
VI.1.4 – Distribuição Mineralógica	126
VI.2 – Minério GI 0164	127
VI.2.1 – Descrição dos Fragmento	128
VI.2.2 – Descrição Mineralógica	130
VI.2.3 – Caracterização das Frações de Sinter Feed	131
VI.2.4 – Distribuição Mineralógica	134
VI.3 – Minério GI 0165	135
VI.3.1 – Descrição dos Fragmento	136
VI.3.2 – Descrição Mineralógica	138
VI.3.3 – Caracterização das Frações de Sinter Feed	139
VI.3.4 – Distribuição Mineralógica	142
VI.4 – Minério GI 0166	144
VI.4.1 – Descrição dos Fragmento	144
VI.4.2 – Descrição Mineralógica	146
VI.4.3 – Caracterização das Frações de Sinter Feed	147
VI.4.4 – Distribuição Mineralógica	150
VI.5 – Minério GI 0358	152
VI.5.1 – Descrição dos Fragmento	152
VI.5.2 – Descrição Mineralógica	154
VI.5.3 – Caracterização das Frações de Sinter Feed	155
VI.5.4 – Distribuição Mineralógica	158
VI.6 – Minério HI 0348	159
VI.6.1 – Descrição dos Fragmento	159
VI.6.2 – Descrição Mineralógica	162
VI.6.3 – Caracterização das Frações de Sinter Feed	163
VI.6.4 – Distribuição Mineralógica	166
VI.7 – Considerações sobre a Descrição dos Minérios	168

VII – Resultados do Estudo Geológico	170
VII.1 – Caracterização Química	170
VII.1.1 – Fe(t)	171
VII.1.2 – PPC	172
VII.1.3 – Outros elementos	174
VII.1.3.1 – FeO	175
VII.1.3.2 – SiO ₂	176
VII.1.3.3 – Al ₂ O ₃	179
VII.1.3.4 – P ₂ O ₅	180
VII.1.3.5 – MnO	181
VII.2 – Caracterização Petrográfica	182
VII.2.1 – subfrações nucleantes	183
VII.2.1.1 – Mineralogia	183
VII.2.1.1.1 – Magnetita	184
VII.2.1.1.2 – Martita	185
VII.2.1.1.3 – Hematita	187
VII.2.1.1.4 – Mineral Hidratado	190
VII.2.1.1.5 – Poros	192
VII.2.1.2 – Textura dos Minérios	193
VII.2.1.3 – Forma dos Fragmentos das subfrações nucleantes	194
VII.2.2 – subfrações aderentes	198
VII.2.2.1 – Mineralogia	200
VII.2.2.1.1 – Magnetita	201
VII.2.2.1.2 – Martita	202
VII.2.2.1.3 – Hematita	202
VII.2.2.1.4 – Mineral Hidratado	204
VII.2.2.1.5 – Quartzo	204
VII.2.2.1.6 – Poros	205
VII.2.2.2 – Textura dos Minérios	206
VII.2.2.3 – Forma dos Fragmentos das subfrações aderentes	207
VII.4 – Considerações Finais	214
VIII – Resultados Experimentais	215
VIII.1 - Produção de Sinteres em Escala Piloto	216
VIII.2 – Micropelotização	220
VIII.2.1 – Micropelotas 4.76 mm	222

VIII.2.2 – Micropelotas 2.83mm	226
VIII.2.3 – Micropelotas 1.00 mm	229
VIII.2.4 – Micropelotas 0.50 mm	232
VIII.2.5 – Micropelotas 0.25 mm	235
VIII.2.6 – Partículas Primárias < 0.25 mm	239
VIII.3 – Distribuição das Partículas Primárias nas Fração Granulométricas de Micropelotas	242
VIII.3.1 – Minério Blendado	243
VIII.3.2 – subfração Nucleante	243
VIII.3.3 – subfração Intermediária	247
VIII.3.4 – subfração Aderente	250
VIII.4 – Considerações do Processo de Microaglomeração	254
VIII.5 – Ensaio de sinterabilidade	256
VIII.6 – Ensaio de Caracterização do Sinter	264
VIII.6.1 – Características químicas dos Sinteres Obtidos	265
VIII.6.2 – Características Físicas dos Sinteres Obtidos	265
VIII.6.2.1 – Teste de Queda	265
VIII.6.2.2 – Teste de Tamboramento	267
VIII.6.3 – Características Metalúrgicas dos Sinteres Obtidos	268
VIII.6.3.1 – Índice de Degradação sob Redução	268
VIII.6.3.2 – Índice de Redutibilidade	270
VIII.6.4 – Avaliação do Comportamento dos Sinteres a Altas Temperaturas	271
VIII.6.4.1 – Avaliação da redutibilidade (grau de redução)	272
VIII.6.4.2 – Ensaio de amolecimento e Fusão	273
VIII.6.4.3 – Vazão de ar e temperatura	275
VIII.6.4.3.1 – subfração Nucleante	276
VIII.6.4.3.2 – subfração Intermediária	277
VIII.6.4.3.3 – subfração Aderente	278
VIII.6.5 - Características mineralógicas e microestruturais	279
IX – Discussão dos Resultados	281
IX.1 – Características dos Minérios de Ferro	284
IX.1.1 – Características mineralógicas e químicas	285
IX.1.2 – Características morfológicas dos fragmentos de minérios	288
IX.2 - Índice de Granulação	292
IX.2.1 – subfração Nucleante	296

IX.2.2 – subfração Intermediária	298
IX.2.3 – subfração Aderente	300
IX.2.4 – Índice de Crescimento e de Nucleação	302
IX.3 – Distribuição das partículas primárias nas micropelotas	305
IX.4 – Testes de Sinterização	313
IX.5 – Características de cada Tipo de Minério	318
IX.5.1 – Minério Blendado	318
IX.5.2 – Minério HI 0348	319
IX.5.3 – Minério GI 0358	322
IX.5.4 – Minério GI 0166	325
IX.5.5 – Minério GI 0137	328
IX.5.6 – Minério GI 0165	331
IX.5.7 – Minério GI 0164	334
IX.6 - Caracterização Geometalúrgica	338
IX.6.1 – Aspectos Gerais	338
IX.6.2 – Minérios Hematíticos	341
IX.6.3 – Minérios Hematíticos Hidratados	343
IX.6.4 – Integração dos Dados	348
X – Conclusões	353
XI – Recomendações para Trabalhos Futuros	360
XII – Referências Bibliográficas	362
ANEXOS	

LISTA DAS FIGURAS

FIGURA 01 – Fotomicrografia das partículas primárias com os diferentes tipos de grau de arredondamento e superfície apresentados pelos fragmentos. Tipos de grau de arredondamento: (Ar) – Arredondado, (Sar) – Subarredondado, (Sag) – Subanguloso, e (Ag) – Anguloso. Tipos de superfícies: (CLs) – Liso; (CSRg) – Semi-rugoso; e (CRg) – Rugoso. (Aumento 20X).	012
FIGURA 02 – Esquema mostrando a razão comprimento/largura; critério utilizado para a determinação do grau de alongação dos fragmentos.	012
FIGURA 03 – Critério utilizado para definição do grau de cristalinidade de um cristal. A superfície de contato entre os cristais pode ser (as setas pretas indicam os tipos citados): (A) Tipo Interdigitado; (B) Tipo Irregular; e (C) Tipo Reto. Fotomicrografias de luz polarizada. Hr – hematita granular; Hl – hematita lamelar; Mg – magnetita; Mh – mineral hidratado; Mt – martita; Pr – poro. (A e B) Aumento de 20X e (C) Aumento de 10X.	013
FIGURA 04 – Tipos de superfície que os cristais podem apresentar. (SL) Superfície Lisa e (SP) Superfície Porosa, como indicado pelas setas. (Fotomicrografia de luz polarizada, Aumento 20X).	014
FIGURA 05 – Fluxograma de tratamento do bolo de sinter e preparação de amostras para caracterização física e metalúrgica, em escala piloto na Usiminas (PIMENTA et al., 2000).	021
FIGURA 06 – Estrutura cristalina dos minerais de ferro. (a) Magnetita; (b) Hematita; (c) Goetita; (d) Siderita e (e) Pirita (DANA & HULBURT, 1984).	030
FIGURA 07 – Gráficos com a produção e consumo de aço nos anos de 1991 e 2001 (http://www.worldsteel.org). (EU – União Européia; NAFTA – Estados Unidos, Canadá e México; Ex-USSR – Antiga União Soviética).	035
FIGURA 08 – Fluxograma das etapas percorridas do minério de ferro até a produção do aço (Modificado de ZAVAGLIA, 1995).	041
FIGURA 09 – Fluxograma esquemático geral do processo de beneficiamento de minério (CASTRO, 1989).	043

FIGURA 10 – Mapa-mundi com os principais depósitos de minério de Ferro de idade pré-cambrianos (HUNDERTMARK, 1996).	047
FIGURA 11 – Ambiente tectônico e os tipos de formações ferríferas associadas (GROSS 1993).	051
FIGURA 12 – Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero com as principais jazidas minério de ferro. O esboço na parte superior à esquerda mostra os detalhes dos domínios de alta e baixa deformação que afetaram as rochas do QF. (GZ, CZ, AZ e TAZ são zonas com diferentes graus metamórficos) (Modificado ROSIÈRE et al., 1993b).	052
FIGURA 13 – Coluna estratigráfica esquemática (modificado CHEMALE et al., 1991, 1994).	053
Figura 14 – Mapa geológico simplificado da região da Serra dos Carajás (modificado de DOCEGEO, 1988, por Chemale et al. 1998).	060
FIGURA 15 – Coluna Cronoestratigráfica das áreas dos Projetos Serra Norte e Pojuca (Modificado MACAMBIRA et al, 1990).	061
FIGURA 16 – Mapa do Quadrilátero Ferrífero com a localização das minas onde foram coletados os minérios para o presente estudo.	065
FIGURA 17 – Perfil Geológico típico da Mina de Alegria (Modificado BARCELOS & BÜCHI, 1986).	067
FIGURA 18 – Mapa Geológico da Mina do Andrade (JANUZZI, 1999).	070
FIGURA 19 – Visão geral da Mina Córrego do Feijão (imagem retirada do site: http://www.ferteco.com.br/feijao.htm).	072
FIGURA 20 – Vista geral do Complexo Tamanduá (imagem retirado do site: (http://www.mbr.com.br/conheca/complexo_tamandua.asp).	073
FIGURA 21 – Mapa geológica da mina do Tamanduá (ZAVAGLIA, 1995).	074
FIGURA 22 – Mapa geológico da Jazida de minério N4 de Carajás (COELHO, 1986).	076
FIGURA 23 – Gráfico da evolução da Produção Mundial de aço bruto – 1945/2001 (ANDRADE et al., 2002; FERREIRA, 2000).	082
FIGURA 24 – Distribuição dos produtores de aço do Brasil em 2001 (ANDRADE et al., 2002).	085
FIGURA 25 – Figura esquemática do desenvolvimento da textura do sinter (DAWSON, 1993).	087
FIGURA 26 – (A) corte longitudinal de um leito de sinterização Dwight-Lloyd; (B) Corte transversal e perfil térmico de um leito de sinterização em um dado instante. (1-7) Descrição no texto. (Modificado de AZEVEDO, 1989).	088
FIGURA 27 - Esquema de troca de calor no leito de sinterização e as temperaturas (de início) das reações de sinterização. Linha cheia:	090

temperaturas (de início) das reações de sinterização. Linha cheia: temperatura do sinter e linha pontilhada: deslocamento do perfil térmico do leito. (modificado de AZEVEDO 1989).

- FIGURA 28 - Correlação entre a preparação da carga e produtividade do processo de sinterização. 092
- FIGURA 29 - Distribuição granulométrica do “sinter feed” (Modificado de AZEVEDO, 1989). 096
- FIGURA 30 – Figura esquemática mostrando a geração dos tipos de micropelotas produzidas e desejáveis. 097
- FIGURA 31 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0137. (A) Minério tipo I – composto basicamente de Hr, com textura granular; (B) Minério tipo II – composto de Hr e HL, os cristais de HL alinhados, sugerindo uma foliação, com textura granular a lamelar; (C) Minério tipo II – composto basicamente de Hr e Pr, com textura granular; e (D) Minério tipo III – composto basicamente de Hr e Pr, com textura granular. (Luz polarizada, Aumento 20X). 121
- FIGURA 32 – Seções Polidas das subfrações nucleantes do *sinter feed* do Minério GI 0137. 124
- FIGURA 33 – Seções Polidas das subfrações aderentes do *sinter feed* do Minério GI 0137. 124
- FIGURA 34 – Gráficos da razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado). 125
- FIGURA 35 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0164. (A) Minério tipo IA – composto basicamente de Hr, com textura granular; (B) Minério tipo IB – composto de Hr e HL, os cristais de HL alinhados, sugerindo uma foliação, com textura intermediária (granular a lamelar); (C) Minério tipo IC – composto basicamente de HL apresentando uma forte orientação que define a foliação principal, sendo cortada por uma segunda foliação de menor penetração, com textura lamelar; e (D) Minério tipo II – composto de Mg martitizada com Hr e HL subordinado, com textura granular. (Luz polarizada, Aumento 10X). 129
- FIGURA 36 — Seções Polidas das subfrações nucleantes do *sinter feed* do Minério GI 0164. 131
- FIGURA 37 — Seções Polidas das subfrações aderentes do *sinter feed* do Minério GI 0164. 132
- FIGURA 38 – Gráficos da razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado). 133
- FIGURA 39 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0165. (A) Minério tipo IA – composto basicamente de Hr, com textura granular; (B) Minério tipo IB – composto de Hr e cristais de HI levemente 137

alinhados, sugerindo uma foliação, com textura intermediária (granular a lamelar); (C) Minério tipo IC – composto basicamente de HI apresentando uma orientação bem definida, gerando a foliação, com textura lamelar; e (D) Minério tipo II – composto de Mg martitzada com Hr e HI subordinado, com textura granular. (Luz polarizada, Aumento 10X).	
FIGURA 40 – Seções Polidas subfrações nucleantes do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0165.	140
FIGURA 41 – Seções Polidas subfrações aderentes do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0165.	140
FIGURA 42 – Gráficos da razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).	141
FIGURA 43 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0166. (A) Minério tipo I – composto basicamente de Mt, Hd, Pr e resquícios de Mg; com textura granular; (B) Minério tipo II – Idem ao anterior, mas com presença sutil de Hr, HI e resquícios de Mg; com textura granular; (C) Minério tipo II – com Mt, Mh, Hr, HI, Mg e Pr, com maior contribuição de hematita; textura granular a lamelar; e (D) Minério tipo III – composto de HI e Pr com Hr, Mt e Mh subordinados, com textura lamelar. (Luz polarizada, Aumento 20X).	145
FIGURA 44 – Seções Polidas subfrações nucleantes do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0166.	148
FIGURA 45 – Seções Polidas subfrações aderentes do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0166.	148
FIGURA 46– Gráficos da razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).	149
FIGURA 47 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0358. (A) Minério tipo I, composto de Mg martitzada e Hr e Pr dispersos; (B) Minério tipo II, composto de Mg martitzada formando estruturas tipo treliça com Hr subordinado e Pr; (C) Minério tipo II, com maior quantidade de HI; e (D) Minério tipo III, composto de Mg na forma de resquícios dentro da Mt, Hr dispersos e bastante poroso. (Luz polarizada, Aumento 20X).	153
FIGURA 48 – Seções Polidas subfrações nucleantes do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0358.	156
FIGURA 49 – Seções Polidas subfrações aderentes do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0358.	156
FIGURA 50 – Gráficos da razão entre os eixos maior e menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).	157
FIGURA 51– Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério HI 0348. (A) Minério tipo I, composto basicamente de Hm com agregados de Hr dispersos, bastante compacto; (B) Minério tipo II, composto de bandas de	161

Hm, bandas de Hm e Mh e bandas de Hr e Hl intercaladas com bandas mais porosas; (C) Minério tipo III, com matriz composta por Hm entrecortada por Pr preenchidos por Hr e Hl; e (D) Minério tipo IV, composto predominantemente por bandas de Hm + Mh com bandas de Hm e Pr subordinados, nas porções mais porosas podem ser encontrados cristais de Hr e Hl dispersos. (Luz polarizada, Aumento 20X).

FIGURA 52 – Seções Polidas subfrações nucleantes do *sinter feed* do Minério HI 0348. 163

FIGURA 53 – Seções Polidas subfrações aderentes do *sinter feed* do Minério HI 0348. 164

FIGURA 54 – Gráficos da razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado). 165

FIGURA 55 – Forma de ocorrência da Mg nos diferentes tipos de minério. (A) GI 0164; (B) – GI 0165, (C) GI 0166 e (C) GI 0358. Fotomicrografias de luz natural, (A e B) Aumento de 10X e (B e C) Aumento de 20X. 185

FIGURA 56 – Feições típicas da Mt. (A) superfície porosa e (B) estrutura tipo treliça. (Fotomicrografias com luz natural, aumento 20X). 187

FIGURA 57 – Imagens de BSE obtidas no MEV, mostrando as feições típicas da Mt. Como podem ser vistos pelas imagens (A) e (B), no processo de martitização da Mg, ocorre a geração de Pr durante a transformação da Mg para Mt. (A) apresenta os cristais de Mt bastante porosos, localmente ocorre a geração de Hr associado, nas porções mais porosas encontram-se cristais de Hl e Mh, essa ocorrência provavelmente deve-se ao espaço para sua cristalização. (B) detalhe dos Pr gerados durante o processo de martitização e com processo de hidratação associado. 187

FIGURA 58 – Fotomicrografias com diferentes tipos de Hematita encontradas nos minérios estudados. (A) Porções de Hm com Hm+Mh, com Hr e Hl cristalizados nos Pr; (B) Mg martitizada com Hm; (C) Hr com Pr; (D) Mt em treliça com resquírios de Mg, com Mh associado, alguns cristais já transformados para Hr, cortados por Hl ligeiramente alinhados; (E) Cristais grandes e granulares de Hr contornados por cristais de Hl; e (F) Cristais de Hl fortemente alinhados. (A,D,E e F) Aumento de 20X e (B e C. Aumento de 10X. (Luz Natural). 189

FIGURA 59 – Imagens de BSE obtidas no MEV evidenciando o processo de hidratação. Na Imagem (A) o Mh ocorre subordinado resquírios de Mt presentes, acompanhando os planos cristalográficos da Mg; e ocorre também, nos contatos entre os cristais de Hl e os Pr. Na imagem (B) temos o detalhe destas formas de ocorrência de Mh. 191

FIGURA 60 – Fotomicrografias com tipos diferentes de ocorrências de Mh, gerados devido ao processo de hidratação nos diferentes minérios. (A) O Mh produto da Mt, ocorre de forma incipiente; (B) O Mh ocorre de forma mais expressiva; (C) O Mh ocorre associado a Hm; e (D) Neste estágio, o Mh ocorre como uma matriz envolvendo os cristais de Mt e Hl. Aumento 20X. Luz Natural. 192

FIGURA 61 – As imagens (A), (B), (C) e (D) apresentam texturas granulares dos seguintes minérios, GI 0137, HI 0348, GI 0358 e GI 0166, respectivamente. A imagem (E) é de um minério com textura lamelar (GI 0164) e a imagem (F) é de um minério com textura lamelar a granular (GI 0165).	195
FIGURA 62 – Ilustração do formato dos cristais de minerais de ferro, de acordo com o grau de alongação médio das subfrações nucleantes dos diferentes tipos de minérios.	195
FIGURA 63 – As imagens (A), (B), (C), (D), (E) e (F) - minérios, GI 0137, HI 0348, GI 0358, GI 0166, GI 0164 e GI 0165, respectivamente.	197
FIGURA 64 – Fotomicrografias de luz polarizada da subfração 6 dos diferentes tipos de minérios. (A) GI 0137; (B) GI 0164; (C) GI 0165; (D) GI 0166; (E) GI 0358; (F) HI 0348. (A, D, E, e F) Aumento 20X; e (C e D) Aumento de 10X.	199
FIGURA 65– Fotomicrografias de luz polarizada da subfração 7 dos diferentes tipos de minérios. (A) GI 0137; (B) GI 0164; (C) GI 0165; (D) GI 0166; (E) GI 0358; (F) HI 0348. (A, D, E, e F) Aumento 20X; e (C e D) Aumento de 10X.	200
FIGURA 66 – Ilustração do formato dos cristais de minerais de ferro, de acordo com o grau de alongação médio, apresentado por cada tipo de minério nas subfrações aderentes (sem escala).	208
FIGURA 67 – Imagem de elétrons secundários obtidos no MEV, mostrando os cristais de hematitas lamelares com Pr internos.	210
FIGURA 68 – Imagens de elétrons secundários obtidos no MEV. Imagens da superfície de contorno dos fragmentos na subfração aderente 6. As imagens (A), (B), (C), (D), (E) e (F) - minérios, GI 0137, HI 0348, GI 0358, GI 0166, GI 0164 e GI 0165, respectivamente.	212
FIGURA 69 – Imagens de elétrons secundários obtidos no MEV. Imagens da superfície de contorno dos fragmentos na subfração aderente 7. As imagens (A), (B), (C), (D), (E) e (F) - minérios, GI 0137, HI 0348, GI 0358, GI 0166, GI 0164 e GI 0165, respectivamente.	213
FIGURA 70 – Distribuição mineralógica dos diferentes níveis de queima das subfrações nucleantes.	218
FIGURA 71 – Distribuição mineralógica dos diferentes níveis de queima das subfrações aderentes.	219
FIGURA 72 – Gráfico das micropelotas de 4.76 mm das subfrações nucleantes dos tipos de minérios estudados com a distribuição das partículas individuais presentes.	223
FIGURA 73 – Gráfico das micropelotas de 4.76 mm das subfrações intermediárias dos tipos de minérios estudados com a distribuição das partículas individuais presentes.	224

FIGURA 74 – Gráfico das micropelotas de 4.76 mm das subfrações aderentes dos tipos de minérios estudados com a distribuição das partículas individuais presentes.	225
FIGURA 75 – Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 2.83 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração nucleante.	226
FIGURA 76 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 2.83 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração intermediária.	227
FIGURA 77 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 2.83 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração aderente.	228
FIGURA 78 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 1.00 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração nucleante.	230
FIGURA 79 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 1.00 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração intermediária.	230
FIGURA 80 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 1.00 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração aderente.	231
FIGURA 81 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0.50 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração nucleante.	233
FIGURA 82 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0.50 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração intermediária.	234
FIGURA 83 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0.50 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração aderente.	234
FIGURA 84 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0.25 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração nucleante.	236
FIGURA 85 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0.25 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração intermediária.	237
FIGURA 86 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0.25 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração aderente.	238
FIGURA 87 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de <0.25 mm dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> na subfração	239

nucleante.

FIGURA 88 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de <0.25 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração intermediária. 240

FIGURA 89 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de <0.25 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração aderente. 241

FIGURA 90 – Subfração nucleante do minério blendado. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 243

FIGURA 91 – Subfração nucleante do minério HI 0348. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 244

FIGURA 92 – Subfração nucleante do minério GI 0358. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 244

FIGURA 93 – Subfração nucleante do minério GI 0166. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 245

FIGURA 94 – Subfração nucleante do minério GI 0137. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 246

FIGURA 95 – Subfração nucleante do minério GI 0165. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 246

FIGURA 96 – Subfração nucleante do minério GI 0164. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 247

FIGURA 97 – Subfração intermediária do minério HI 0348. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas 248

primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

FIGURA 98 – Subfração intermediária do minério GI 0358. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 248

FIGURA 99 – Subfração intermediária do minério GI 0166. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 249

FIGURA 100 – Subfração intermediária do minério GI 0137. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 249

FIGURA 101 – Subfração intermediária do minério GI 0165. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 250

FIGURA 102– Subfração intermediária do minério GI 0164. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 250

FIGURA 103 – Subfração aderente do minério HI 0348. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 251

FIGURA 104 – Subfração aderente do minério GI 0358. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 252

FIGURA 105 – Subfração aderente do minério GI 0166. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 252

FIGURA 106 – Subfração aderente do minério GI 0137. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas 253

primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

FIGURA 107 – Subfração aderente do minério GI 0165. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 253

FIGURA 108 – Subfração aderente do minério GI 0164. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias. 254

FIGURA 109 – Gráficos dos minérios e suas respectivas subfrações e os seus comportamentos durante o processo de microaglomeração. 303

FIGURA 110 – Gráfico com a distribuição das partículas primárias nos diferentes tamanhos de micropelotas. 306

FIGURA 111 – Gráficos dos diferentes tipos de minérios na subfração nucleante, com a distribuição das partículas primárias nos diferentes tamanhos de micropelotas. 307

FIGURA 112 – Gráficos dos diferentes tipos de minérios nas suas subfrações intermediárias, com a distribuição das partículas primárias nos diferentes tamanhos de micropelotas. 308

FIGURA 113 – Gráficos dos diferentes tipos de minérios na sua subfração aderente, com a distribuição das partículas primárias nos diferentes tamanhos de micropelotas. 309

FIGURA 114 – Gráfico com as médias de crescimento das micropelotas e grau de granulação dos diferentes níveis de queimas realizadas no presente estudo. N – subfração Nucleante; I – subfração Intermediária; e A – subfração Aderente. 310

LISTA DAS TABELAS

TABELA 01 – Resultado da preparação preliminar das amostras recebidas pelo Centro de Pesquisas da Usiminas, com a distribuição dos minérios, após o peneiramento e a britagem, separados nas frações 0 – 5 mm e 5 – 10 mm. (ND – Não determinado).	007
TABELA 02 – Tabela com o programa de execução das queimas das misturas, divididas por etapas. Os níveis (01 a 07) minérios estudados como subfração nucleante; níveis (08 a 13) minérios estudados como subfração aderente e níveis (14 a 19) minérios estudados como subfração intermediária.	017
TABELA 03 – Tabela com a distribuição granulométrica das diferentes frações de sinter feed, adotada nesse trabalho.	017
TABELA 04 – Tabela com as proporções de cada granulação do combustível, fundentes e adições utilizados, nos testes em escala piloto do presente estudo.	018
TABELA 05 – Condições termoredutoras utilizadas nos ensaios de redutibilidade (R_{1000}) e de amolecimento e fusão.	026
TABELA 06 – Principais minerais de ferro e suas classes. (POVEROMO, 1999; DEER et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com).	029
TABELA 07 – Reservas mundiais de minério de ferro por país em 2001 (BDMG, 2002).	033
TABELA 08 – Produção mundial de minério de ferro por País, de 1997-2001 (em milhões de toneladas) (BDMG, 2002).	034
TABELA 09 – Distribuição e balanço do comércio dos minérios de ferro entre os países produtores e importadores em 2000. (http://www.worldsteel.org).	036
TABELA 10 – Proporção de BIF pelo tempo (modificado de GOODWIN 1982).	047
TABELA 11 – Principais feições de cada fácies das formações ferríferas (JAMES, 1954).	050
TABELA 12 – Composição mineralógica dos diferentes tipos de minério do QF (ROSIÈRE et al., 1991).	058

TABELA 13 – Blocos operacionais da Siderurgia Brasileira (1997) (ANDRADE et al., 2002 - Fonte: BNDES).	086
TABELA 14 - Observações relativas aos teores de sílica, alumina, fósforo e ppc de minérios para sinterização (Modificado de CARNEIRO et al., 1985 e VIEIRA et al. 1998).	095
TABELA 15 - Características das partículas do minério de ferro (Modificado de AZEVEDO, 1991 e VIEIRA et al., 1998).	097
TABELA 16 – Seqüência de gerações de óxidos de ferro do QF (ROSIÈRE et al., 1993a).	111
TABELA 17 – Principais atributos estruturais que deverão constituir a identidade estrutural de minério de ferro para uso em sinterização (Modificado VIEIRA et al., 1998).	116
TABELA 18 – Resumo das principais características de cada tipo de minério estudado.	119
TABELA 19 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do Minério GI0137.	122
TABELA 20 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0137.	125
TABELA 21 – Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0137.	126
TABELA 22 – Distribuição mineralógica das subfrações do <i>sinter feed</i> do Minério GI0137. Na subfração nucleante 3 encontra-se traço de Mh.	127
TABELA 23 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do Minério GI0164.	130
Tabelar 24 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0164.	132
TABELA 25 – Características principais das subfrações aderentes do minério GI0164.	133
TABELA 26 – Distribuição Mineralógica das subfrações do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0164.	134
TABELA 27 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do Minério GI0165.	138
TABELA 28 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0165.	140
TABELA 29 – Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0165.	142
TABELA 30 – Distribuição Mineralógica das subfrações do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0165.	143

Minério GI 0165.	
TABELA 31 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do Minério GI0166.	146
TABELA 32 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0166.	149
TABELA 33 – Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0166.	150
TABELA 34 – Distribuição Mineralógica das subfrações do <i>sinter feed</i> do Minério GI 0166.	151
TABELA 35 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do Minério GI0358.	154
TABELA 36 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0358.	157
TABELA 37 - Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0358.	157
TABELA 38 – Distribuição Mineralógica das subfrações de <i>sinter feed</i> do Minério GI 0358.	158
TABELA 39– Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do Minério HI 0348.	162
TABELA 40 – Características principais das subfrações nucleantes do minério HI 0348.	165
TABELA 41 – Características principais das subfrações aderentes do minério HI 0348.	165
TABELA 42 – Distribuição Mineralógica das subfrações de <i>sinter feed</i> do Minério HI 0348.	166
TABELA 43 – Tabela com as texturas predominantes das subfrações nucleantes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	194
TABELA 44 – Tabela com as principais características das formas das partículas primárias das subfrações nucleantes nos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	194
TABELA 45 – Tabela com as texturas predominantes das subfrações aderentes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	207
TABELA 46 – Principais características das formas das partículas primárias das subfrações aderentes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	208
TABELA 47 – Principais características das partículas primárias das subfrações aderentes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> estudados.	211

TABELA 48 – Tabela com as classificações dentre as subfrações do desempenho de cada tipo de minério, em relação à geração de micropelotas maiores (MM) e consumo de partículas aderentes mais finas (PA)	255
TABELA 49 – Tabela com os ensaios de sinterabilidade dos 19 níveis de queimas obtidos durante o processo de sinterização dos tipos de minérios estudados.	257
TABELA50 – Principais parâmetros recomendados para identificação do sinter feed e como afetam o produto sinter e o processo de sinterização.	282
TABELA 51 – Tabela com os principais resultados obtidos no presente estudo. Prod. – Produtividade; FR – Finos de Retorno; ST – Shatter Test; TT – Tumbler Test;Re – Redutibilidade.	283

LISTAS DOS GRÁFICOS

GRÁFICO 01 – Distribuição mineralógica das subfrações do <i>sinter feed</i> do minério GI 0137. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)	127
GRÁFICO 02 – Distribuição mineralógica das subfrações do <i>sinter feed</i> do minério GI 0164. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)	135
GRÁFICO 03 – Distribuição mineralógica das subfrações do <i>sinter feed</i> do minério GI 0165. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)	143
GRÁFICO 04 – Distribuição mineralógica das subfrações do <i>sinter feed</i> do minério GI 0166. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)	151
GRÁFICO 05 - Distribuição mineralógica das subfrações de <i>sinter feed</i> do minério GI 0358. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)	159
GRÁFICO 06 - Distribuição mineralógica das subfrações de <i>sinter feed</i> do minério HI 0348. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)	167
GRÁFICO 07 – O gráfico acima apresenta as variações do teor de Fe(t) das subfrações granulométricas de cada tipo de minério. A descrição detalhada encontra-se no texto.	172
GRÁFICO 08 – Teores de PPC em cada subfração granulométrica de todos os minérios estudados.	174
GRÁFICO 09 – Gráfico com os teores de FeO em cada subfração granulométrica dos minérios GI 0137, GI 0164, GI 0166, GI 0165 E HI 0348.	175
GRÁFICO 10 – Gráfico com o teor de FeO em cada subfração granulométrica do Minério GI 0358.	176
GRÁFICO 11 – Teor de SiO ₂ das subfrações granulométricas dos minérios estudados, com exceção do minério GI 0166.	177
GRÁFICO 12 – Teor de SiO ₂ das subfrações granulométricas do minério GI 0166 estudado.	178
GRÁFICO 13 – Teores de Al ₂ O ₃ das subfrações granulométricas de todos minérios estudados.	179

GRÁFICO 14– Teores de P ₂ O ₅ das subfrações granulométricas de todos minérios estudados.	180
GRÁFICO 15 – Teores de MnO das subfrações granulométricas de todos minérios estudados.	181
GRÁFICO 16 – Distribuição média de Mg nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	186
GRÁFICO 17 – Distribuição média de Mt nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	186
GRÁFICO 18 – Distribuição média de Hr nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	188
GRÁFICO 19 – Distribuição média de Hl nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	188
GRÁFICO 20 – Distribuição média de Mh nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	191
GRÁFICO 21 – Distribuição média de Pr nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	193
GRÁFICO 22 – Distribuição média de Mg nas diferentes subfrações aderentes de <i>sinter feed</i> .	201
GRÁFICO 23 – Distribuição média de Mt nas diferentes subfrações aderentes de <i>sinter feed</i> .	202
GRÁFICO 24 – Distribuição média de Hr nas diferentes subfrações aderentes de <i>sinter feed</i> .	203
GRÁFICO 25 – Distribuição média de Hl nas subfrações aderentes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	203
GRÁFICO 26 – Distribuição média de Mh nas subfrações aderentes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	204
GRÁFICO 27 – Distribuição média de Qz nas subfrações aderentes dos diferentes tipos de <i>sinter feed</i> .	205
GRÁFICO 28 – Distribuição média de Pr nas diferentes subfrações aderentes de <i>sinter feed</i> .	206
GRÁFICO 29 – Grau de liberação cristalina e a porosidade da subfração aderente 6.	209
GRÁFICO 30 – Grau de liberação cristalina e a porosidade da subfração aderente 7.	209
GRÁFICO 31 – Gráfico do Peso Seco Carregado (PSC) das misturas utilizadas nos 19 níveis de queima realizadas para o presente trabalho. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	258

GRÁFICO 32 – (A) Gráfico apresentando a ensidade de carga contra o tempo da subfração nucleante. (B) Gráfico apresentando a densidade de carga contra o tempo da subfração aderente. (C) Gráfico apresentando a densidade de carga contra o tempo da subfração intermediária.	260
GRÁFICO 33 – Gráfico com o <i>coke rate</i> dos níveis de queima utilizado na realização do presente trabalho. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária; e linha pontilhada separa o minério blendado e as subfrações dos minérios.	261
GRÁFICO 34 – Gráfico comparativo entre retorno <5 mm e retorno total das misturas utilizadas em todos níveis de queima realizados no presente trabalho. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	262
GRÁFICO 35 – Gráficos com a produtividade dos níveis de queima utilizado na realização do presente trabalho. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	263
GRÁFICO 36 – Resultados dos testes de queda dos 19 níveis de queimas realizados. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	266
GRÁFICO 37– Resultados dos testes de tamboramentos dos 19 níveis de queima realizados. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	267
GRÁFICO 38– Resultado de RDI dos 19 níveis de queima realizados. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	269
GRÁFICO 39 – Resultado do índice de redutibilidade dos 19 níveis de queima realizados. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	270
GRÁFICO 40 – Resultado do índice de redutibilidade à 1000° C dos 19 níveis de queima realizados. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	277 2
GRÁFICO 41 – Resultado do ensaio de amolecimento e fusão dos 19 níveis de queima realizados. Foi observada a temperatura de amolecimento (TA); temperatura de início da perda de carga do gás (TS) e temperatura correspondente ao final da fusão do metal (TF). (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	274
GRÁFICO 42 – Resultado da caracterização mineralógica dos sinteres obtidos dos 19 níveis de queima realizados. (N) Nucleante; (A) Aderente; (I) Intermediária.	279
GRÁFICO 43 – Gráficos com os Índices de Crescimento das micropelotas > 1,00 mm (direita) e o Índice de granulação das micropelotas < 1,00 mm (esquerda) dos diferentes tipos de minérios na subfração nucleante.	297
GRÁFICO 44 – Gráficos com os Índices de Crescimento das micropelotas > 1,00 mm (direita) e o Índice de granulação das micropelotas < 1,00 mm (esquerda) dos diferentes tipos de minérios na subfração intermediária.	299
GRÁFICO 45 – Gráficos com os Índices de Crescimento das micropelotas > 1,00 mm (direita) e o Índice de granulação das micropelotas < 1,00 mm (esquerda) dos diferentes tipos de minérios na subfração aderente.	301

LISTAS DAS ABREVIATURAS

Af	Anfibólio	Mg	Magnetita
Ag	Anguloso	Mh	Mineral Hidratado
Ar	Arredondado	Mt	Martita
AZ	Zona da Actinolita	PB	Peso Bruto
C/L	Razão Comprimento (C) versus Largura (L)	PSC	Peso Seco Carregado
CLs	Contorno Liso	Pr	Poros
CRg	Contorno rugoso	Qz	Quartzo
CSRg	Contorno Semirugoso	RDI	Índice de Redução sob Degradação
CZ	Zona da Clorita	RI	Índice de Redutibilidade
DC	Densidade de Carga	RI1000	Índice de Redutibilidade a 1000 °C
GI 0137	Mina de Tamanduá	Sag	Subanguloso
GI 0164	Mina de Andrade (lamelar)	Sar	Subarredondado
GI 0165	Mina de Andrade (granular)	SL	Superfície Lisa
GI 0166	Mina de Alegria	SP	Superfície Porosa
GI 0358	Mina do Córrego do Feijão	ST	<i>Shatter test</i>
GZ	Zona da Granada	TA	Temperatura de Amolecimento
HI 0348	Mina de Carajás	TAZ	Zona da Tremolita-Actinolita
HI	Hematita Lamelar	TT	<i>Tumbler test</i>
Hm	Hematita Microcristalina	ΔT	Diferença entre temperatura de amolecimento e fusão
Hr	Hematita Granular		

I – INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia da indústria do aço, nas últimas décadas, fez com que os diversos tipos de minérios apresentem qualidades químicas e físicas específicas, os quais são processados nas indústrias de aço modernas.

Atualmente, no sentido de otimizar os processos siderúrgicos, grandes esforços têm-se voltado à engenharia e aos conhecimentos científicos, desenvolvidos e aplicados na indústria siderúrgica (CAPOLARI et al., 1998). Este fato gerou uma necessidade global de se conhecer melhor os tipos de minério de ferro existentes e os seus desempenhos metalúrgicos (SANTIAGO et al., 2000; VIEIRA et al., 2000; ROSIÈRE et al., 1998).

A utilização do minério de ferro inicia-se desde o conhecimento do depósito de minério até a obtenção do ferro metálico (ferro-gusa e/ou ferro-esponja) (HUNDERTMARK, 1996). Assim demonstra a necessidade de um envolvimento maior dos conhecimentos geológicos, de mineração e metalúrgicos.

Os parâmetros geológicos consistem na identificação dos minerais de minérios e da ganga; os parâmetros de mineração buscam horizontes com maior exploração de minério rico, menor quantidade de ganga e minério com maior facilidade de beneficiamento; enquanto os parâmetros de tratamento de minérios envolvem teores químicos e granulometria (frações: granulada, *sinter feed* e *pellet*

feed); e os parâmetros metalúrgicos envolvem os fatores de resistência, grau de redutibilidade, porosidade dos agregados, teor de FeO, entre outros.

A diferença de enfoque, observada em cada área, para um mesmo material, faz com que seja necessária a elaboração de um planejamento em conjunto, na busca de uma maior otimização de todo processo siderúrgico.

A busca deste conhecimento deve envolver uma caracterização geológica mais detalhada; associada e correlacionada com as características metalúrgicas do minério de ferro. Isso pode gerar a necessidade ou não de uma adequação no processo de tratamento do minério, para levar ao aumento da eficiência do sistema minério - tratamento - siderurgia. A integração dessas três áreas conduzirá a uma maior produtividade e a um menor custo operacional para cada área envolvida.

A composição da carga metálica utilizada, nos grandes altos-fornos brasileiros atuais, é composta de 80 % do produto sinter (SOUZA NETO et al., 1998) e o restante composto por granulados e/ou *pellets*. Devido a isso, a caracterização do sinter e o conhecimento dos parâmetros envolvidos no processo de sinterização cresceram de importância.

As características metalúrgicas utilizadas, atualmente, na escolha dos minérios de ferro, têm-se mostrado insuficientes para obtenção de sinter com a qualidade adequada para uso em altos-fornos (PIMENTA et al., 2000; CAPOLARI et al., 1998; ROSIÈRE et al., 1996a e 1996b; XAVIER, 1994; ZAVAGLIA, 1995; ARAÚJO FILHO et al., 1984; CARNEIRO et al., 1983; SILVA NETO et al., 1980). Isto porque, em algumas siderúrgicas, o minério de uma mesma jazida ou mesma carga de minério (que pode conter minérios de uma ou mais jazidas de ferro), com características metalúrgicas e processo de sinterizações iguais, produz sínteres de qualidades diferentes (CVRD, 1998).

Os fatos demonstram que outros fatores, além das características metalúrgicas, devem influenciar na qualidade do sinter produzido, e que, provavelmente, estão relacionados às características mineralógicas, microestruturais e texturais do minério (CAPOLARI et al., 1998; ROSIÈRE et al., 1996a, 1996b; XAVIER, 1994; ZAVAGLIA, 1995; entre outros).

Por outro lado, os diferentes minérios de ferro brasileiros, explorados comercialmente, são considerados hematíticos e apresentam teores de ferro

elevados e quantidades pequenas de elementos deletérios; as granulometrias desses minérios são separadas nas próprias minerações.

A grande variação desses minérios ocorre, principalmente, nos diferentes tipos e formas dos cristais de hematita, que indicam diferentes condições para sua formação. Dessa forma, um melhor entendimento do comportamento dos diferentes tipos de minérios durante o processo de sinterização pode ser a chave para entender o processo de transformação do minério de ferro, detalhando-se as várias etapas pela qual os minérios passam, desde a seleção do tipo de minério (sinter) até a obtenção do produto sinter final.

Um melhor entendimento dos processos de transformações, é buscado por vários pesquisadores de universidades, usinas siderúrgicas e minerações. Através dos conhecimentos geológicos (ROSIÈRE et al., 1993a e 1993b; XAVIER, 1994; ZAVAGLIA, 1995; HASHIZUME, 1999; entre outros), de mineração (SCHNEIDER et al., 1999; SILVA, 1999; TAVARES, 1999; entre outros) e metalúrgicos (PIMENTA et al., 2000; ARAÚJO FILHO et al., 1984; CARNEIRO et al., 1983; SILVA NETO et al., 1980; entre outros).

O presente doutoramento tem como uma abordagem pioneira a caracterização das subfrações nucleantes, aderentes e intermediárias da fração *sinter feed*, dos diferentes tipos de minério de ferro escolhidos e a correlação do desempenho dessas subfrações como compostos dos diferentes tipos de misturas utilizadas no processo de sinterização realizado. Esse estudo foi desenvolvido em conjunto com os pesquisadores do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da USIMINAS (Ipatinga-MG). A caracterização do minério foi realizada na UFRGS e a preparação, a sinterização e os testes de qualidade das misturas dos minérios foram realizados na USIMINAS.

I.1 – Objetivos

O presente trabalho teve como principais objetivos:

1. Conhecer melhor os tipos de minérios de ferro nas três subfrações (nucleante, aderente e intermediária) da fração *sinter feed*, utilizando suas características intrínsecas, geradas durante o processo geológico de formação do minério, tais como: distribuição mineralógica; grau de porosidade; características de contorno das partículas primárias; tamanho e forma dos cristais de minerais de ferro e poros; e características de contorno dos cristais de minerais de ferro e poros;
2. Conhecer o comportamento da fração *sinter feed* dos seis (06) tipos de minérios escolhidos, nas suas diferentes subfrações (nucleante, aderente e intermediária) e uma mistura desses minérios (minério blendado), correspondendo a 19 (dezenove) níveis de queimas:
 - No processo de microaglomeração;
 - No processo de sinterização;
3. Obter os parâmetros de sinterabilidade dos sínteres gerados pelos 19 (dezenove) níveis de queimas realizados;
4. Correlacionar as características geológicas com os parâmetros de sinterabilidade dos minérios; e
5. Associar as características intrínsecas do minério que influenciam em cada tipo de parâmetro de qualidade do síter.

I.2 – Metodologia

O trabalho teve início com o estudo preliminar, sobre os diferentes tipos de minério encontrados no Quadrilátero Ferrífero e Carajás, baseando-se nos trabalhos de CHEMALE et al., 1991; ROSIÈRE et al., 1993a, 1993b e 1996; VIEIRA et al., 1996; entre outros. Dos minérios presentes nessas regiões, foram escolhidos quatro (4) tipos básicos, diferenciados pela sua mineralogia e textura, a saber: martítico; hematítico granular; hematítico lamelar e hidratado.

A partir dessa definição, procurou-se associar esses diferentes tipos de minérios, com os produzidos, atualmente, pelas diversas minerações do Quadrilátero Ferrífero e Carajás. As minerações, que se encaixaram nos perfis escolhidos, foram procuradas e apresentadas ao projeto de tese, que, na sua maior parte, aceitaram em participar do projeto de doutoramento com o fornecimento dos minérios eleitos.

O mesmo projeto foi apresentado a algumas Usinas Siderúrgicas, buscando-se assim, uma parceria para execução do processo experimental de sinterização dos minérios escolhidos. Das usinas contatadas, a Usiminas (Usina Siderúrgica de Minas Gerais S.A.), através de sua gerência em Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, aceitou fazer os testes de sinterização, disponibilizando o pessoal técnico e a infra-estrutura do seu Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Ipatinga (MG).

No Quadrilátero Ferrífero foram visitadas sete (07) minas: Águas Claras, Alegria, Andrade, Córrego do Feijão, Mutuca, Pico e Tamanduá; das quais foram coletadas 10 amostras de mãos, sendo três (03) na Mina de Águas Claras, duas (02) na Mina de Tamanduá e apenas uma (01) amostra nas demais minas. O minério da Serra de Carajás foi enviado, através de um acordo entre o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas e os responsáveis técnicos da CVRD em Carajás.

As amostras de mão foram coletadas próximos aos locais que seriam retirados os minérios a serem sinterizados. Essas amostras foram utilizadas para fazer-se um estudo prévio dos minérios que seriam enviados à Usiminas. Este estudo prévio serviu como base para reconhecer e confirmar algumas características dos minérios escolhidos.

As minerações visitadas enviaram 14 (quatorze) amostras de minérios compactos e/ou a sua fração *sinter feed* comercial, para o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas (Ipatinga-MG).

As Minas de Águas Claras e Mutuca enviaram as amostras dos tipos de minérios que tiveram as suas respectivas amostras de mãos coletadas, que foram: Águas Claras (GI 0021; GI 0022 e GI 0023) e Mutuca (GI 0039). As Minas do Pico e Tamanduá enviaram, além dos minérios compactos: Pico (GI 037) e Tamanduá (GI 0138) (onde foram coletadas as amostras de mão), enviaram também, o minério da sua fração *sinter feed*: Pico (GI 0038) e Tamanduá (GI 0137), para serem avaliados.

As Minas de Alegria (GI 0166) e Andrade (hematítico lamelar – PIC – GI 0164 e granular – PAÇO – GI 0165) fizeram a britagem de seus minérios no Centro de Pesquisa da SAMITRI e enviaram os minérios já preparados nas frações granuladas e *sinter feed*.

As Minas de Córrego do Feijão (GI 0358) e Carajás (HI 0348) enviaram a fração granulada e a fração *sinter feed* de seus minérios, conforme poderá ser observado pela distribuição granulométrica apresentada por cada minério durante a sua preparação no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas (TABELA 01).

I.2.1 – PREPARAÇÃO DOS MINÉRIOS

As amostras recebidas pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas foram todas catalogadas. O início do processo de preparação das amostras consistiu de duas etapas principais: o processo de peneiramento e a britagem posterior, das frações maiores que 10 mm, até atingirem a fração adequada ao estudo.

Minério	Peneirado (kg)		Britado (kg)		Como recebido (kg)	NPO (kg)	Total (kg)
	0 mm - 5 mm	5 mm - 10 mm	0 mm-5 mm	5 mm - 10 mm			
GI 0021	nd	nd	1078	1289	90	90	2547
GI 0022	nd	Nd	1104	1183	78	130	2495
GI 0023	1697	143	51	22	34	nd	1972
GI 0037	34	13	745	764	49	108	1713
GI 0038	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
GI 0039	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
GI 0137	718	218	417	375	nd	100	1828
GI 0138	nd	nd	430	400	nd	100	930
GI 0139	nd	nd	680	650	nd	110	1440
GI 0164	2039	323	53	41	30	nd	2486
GI 0165	2220	510	37	32	26	nd	2829
GI 0166	920	535	51	40	18	nd	1564
GI 0358	3671	427	208	355	28	59	4747
HI 0348	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

TABELA 01 – Resultado da preparação preliminar das amostras recebidas pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, com a distribuição dos minérios, após o peneiramento e a britagem, separados nas frações 0 mm – 5 mm e 5 mm – 10 mm. (nd – Não determinado).

O processo de peneiramento foi realizado em peneira vibratória de dois *decks*. O material passante foi dividido em duas frações (0 mm – 5 mm e 5 mm a 10 mm); o material retido, acima de 10 mm, foi britado no britador de mandíbulas, sendo novamente peneirado na peneira vibratória de dois *decks*. Esse processo é repetido até que todo o material fique abaixo de 10 mm.

No processo de britagem, quando o minério atingiu a granulometria abaixo de 40mm (Granulometria NPO), foi retirada uma alíquota e guardada para testes de amolecimento e fusão. Assim, O minério foi dividido em duas frações, a de 0 mm - 5 mm e a de 5 mm - 10 mm, sendo estas separadas em frações

resultantes do primeiro peneiramento e do segundo peneiramento (resultante do minério britado).

Algumas amostras passaram por processo de lavagem com água pressurizada, devido às incrustações de argila. O primeiro é o minério GI 0358, que gerou dois tipos de lamas, uma mais espessa (GI 0358/1) e outra mais fina (GI 0358/2) que foram secas e armazenadas. Enquanto que, o minério GI 0037 apresentou uma certa quantidade de finos aderidos à superfície das partículas primárias; o material abaixo de 10 mm foi separado no peneiramento e as partículas primárias maiores foram lavadas para serem britadas.

As frações dos minérios britados foram divididas em duas: granulada e *sinter feed*. A fração granulada consiste nas partículas primárias de minérios com tamanho de 9,52 mm - 12,7 mm, não sendo utilizada no presente estudo.

A fração *sinter feed* consiste da fração < 0,105 mm - 9,52 mm, sendo esta dividida em sete (07) subfrações, a saber: Subfração 1 – Supergrossos (5,00 mm - 9,52 mm); Subfração 2 – Nucleantes 1 (2,83 mm – 5,00 mm); Subfração 3 – Nucleantes 2 (1,00 mm – 2,83 mm); Subfração 4 – Intermediária 1 (0,50 mm – 1,00 mm); Subfração 5 – Intermediária 2 (0,25 mm – 0,50 mm); Subfração 6 – Aderentes 1 (0,105 mm – 0,25 mm); e Subfração 7 – Aderentes 2 (< 0,105 mm). Essas subfrações foram armazenadas em tambores com suas respectivas identificações, para serem sinterizadas posteriormente. O presente trabalho utilizará apenas as 7 subfrações especificadas acima.

As amostras da fração *sinter feed* de todos os minérios foram separadas e confeccionadas suas seções polidas, para a escolha dos minérios a serem utilizados no presente estudo.

Os minérios foram escolhidos com apoio de estudos de microscopia ótica: hematítico/martítico granular (GI 0358), hematítico/martítico hidratado granular (GI 0166), hematítico granular (GI 0137), hematítico microcristalino (HI 0348), hematítico granular (GI 0165) e hematítico lamelar (GI 0164).

As frações *sinter feed* dos minérios escolhidos foram preparadas nas subfrações descritas acima, sendo confeccionadas seções polidas de cada uma das subfrações nucleantes e aderentes. Essas seções polidas foram utilizadas para estudo de caracterização: mineralógica, textural e estrutural. A caracterização das composições mineralógicas, o seu arranjo e grau de orientação nas partículas

primárias, das diferentes subfrações do *sinter feed*, forma um dos pilares do presente estudo.

A confecção das seções polidas foi feita seguindo o procedimento padrão adotado na UFRGS. As amostras foram quarteadas até a quantidade suficiente para encher as formas. Após esse procedimento, fez-se a preparação da resina com 6 partes de cola e 1 de endurecedor utilizadas no preenchimento dos espaços vazios entre as partículas primárias das seções. As seções prontas foram colocadas na estufa a 40 °C para secar, por 24 horas. Após a secagem, as seções foram retiradas das formas e iniciado o processo de lixamento.

As subfrações nucleantes foram confeccionadas em formas feitas de PVC, com cinco centímetros de diâmetro, devido ao tamanho de suas partículas primárias; e as subfrações aderentes foram confeccionadas em formas de 1" (uma polegada) padrão *Struers*. Esses tamanhos diferenciados de formas devem-se à representatividade da amostragem das subfrações estudadas.

O processo de lixamento das seções é iniciado com a lixa de granulação 320 e passando pelas lixas de granulação 800, 1200 e 4000. Após esta última, passa-se ao processo de polimento, com pastas de diamante de 9 µm, 6 µm, 3 µm e 1/4 µm. O processo de troca de lixas ou pastas de diamante dá-se quando a lixa ou a pasta utilizada apaga os riscos da lixa anterior (mais grossa). A pasta de diamante de 1/4 µm consiste na parte mais demorada do processo, pois é a pasta que dá o acabamento final.

I.2.2 – CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO

As caracterizações: mineralógica e textural, do minério foram feitas com um microscópio *LEICA DM7LP* de luz refletida (natural e polarizada); utilizou-

se também Lupa Zeiss de luz refletida indireta para definir a forma das partículas primárias.

A aquisição de imagens dos minérios foi feita com uma câmera colorida de vídeo 3CCD da *SONY-Exwave HAD*, acoplada ao microscópio *LEICA DM7LP*. As imagens foram adquiridas com objetivas de 2,5X, 5X, 10X, 20X e 50X (esta última, para aquisição de imagens com detalhes específicos).

A contagem modal e medição do tamanho das partículas primárias e cristais foram feitas nas imagens adquiridas, utilizando-se os programas *Paint Shop Pro 5*, *Adobe Photoshop* e *Sami beta 2.1*.

Os dois primeiros são programas comerciais de geração de imagens, onde a contagem modal foi feita com a utilização de uma rede de 1x1 cm sobre a imagem de tamanho de 15x10 cm, sendo feita contagem ponto a ponto para cada imagem adquirida.

O terceiro é um programa de processamento e análise qualitativa e quantitativa de imagens, desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Santa Maria. Esse programa permite a separação, de cada fase presente na imagem, em tons de cinzas. Cada fase é dada por um corte entre um maior e menor valor do tom de cinza, representando uma faixa de tons de cinza medida, ou seja, os tons de cinza intermediários aos valores extremos são equalizados para representarem essa fase. Assim, o programa quantifica o percentual dos tons de cinza especificados para cada fase na imagem, fazendo-se assim uma contagem modal automática das fases presentes.

O programa *Sami beta 2.1* mostrou ser eficaz nos minérios que apresentam fases bem contrastantes em cada imagem. Os resultados obtidos da contagem modal feita por esse programa, em comparação com as contagens modais feitas manualmente, apresentaram uma diferença de $\pm 1\%$ a 10% . A maior diferença é observada quando a granulação do minério é muito fina, sendo difícil definir a linha de corte para cada tom de cinza, aumentando a margem de erro. Para os minérios que apresentam duas fases bastante distintas, com granulação média a grosseira, essa margem de erro fica em torno de 1% a 2% , sendo possível a sua utilização para contagens modais.

A principal restrição do programa *Sami beta 2.1* está na iluminação: a sua variação afeta muito o nível de corte, podendo incorrer em grandes variações nos resultados obtidos. A sua utilização de forma rotineira necessita de um maior

cuidado, tanto na aquisição das imagens quanto no corte de tons de cinzas. No entanto, a sua utilização em cada imagem de forma individualizada é possível e torna o processo de contagem modal mais rápido. Mas, para isso, é necessário ter um conhecimento prévio das fases presentes, para saber qual o tom de cinza referente a cada fase a ser separada.

Os minérios foram descritos, utilizando-se como parâmetros as características óticas dos minerais de ferro presentes, sob luz natural e polarizada do microscópio ótico. A textura e trama teve como base a caracterização feita pela CVRD (Companhia Vale do Rio Doce) (Relatório Interno, 1998), ANEXO I, com algumas modificações nessa classificação.

A descrição inicia-se com a caracterização das partículas primárias de minério que podem ser diferenciadas por tipos. Alguns minérios apresentam a mineralogia e a forma das partículas primárias homogêneas que podem ser colocadas como sendo tipo único. Outros minérios apresentam tanto a mineralogia quanto a forma das partículas primárias heterogêneas, diferenciando o mesmo minério por tipos. Em ambos os casos, esses minérios podem apresentar grau de porosidade diferenciada, que pode estar na forma de bandas, formando partículas primárias bandadas ou como porções granulares distribuídas de forma aleatória.

A forma das partículas primárias foi caracterizada, utilizando os critérios de grau de arredondamento, tipos de superfície e grau de alongação, conforme descritos a seguir.

A caracterização da forma das partículas primárias teve como base a terminologia utilizada na petrologia sedimentar para a descrição de grãos, que é baseado no grau de arredondamento (FIGURA 01), sendo feita uma adaptação da classificação de *Russel-Taylor-Pettijohn* (EL-HINNAWI, 1966). As partículas primárias serão descritas de acordo com os seguintes critérios:

- (a) *Anguloso*: bordas e contornos bem definidos e retos;
- (b) *Subanguloso*: as bordas e contornos são retos a levemente arredondados;
- (c) *Subarredondado*: as bordas e contornos são arredondados a levemente retos;
- (d) *Arredondado*: as bordas e contornos são bem arredondados

As partículas primárias podem ter a superfície de contorno externa, rugosa ou lisa (FIGURA 01). A superfície é denominada rugosa, quando há um grande número de reentrâncias (buracos) presente na sua superfície de contorno;

denominada lisa, quando a mesma não apresentar essas reentrâncias. Essas reentrâncias são causadas pelos poros existentes dentro dessas partículas primárias. A superfície semi-rugosa é assim denominada, quando são encontradas partículas primárias com porções de superfícies rugosas e lisas.

O grau de alongação será definido pela razão comprimento (C) / largura (L) medida em cada partícula primária (FIGURA 02). Através dessa razão, pode-se dividir as partículas primárias nos seguintes graus de alongação:

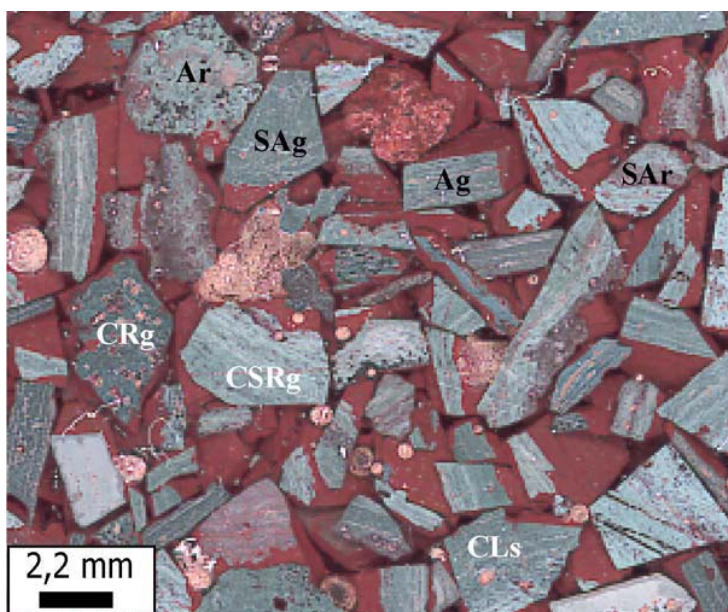


FIGURA 01 – Fotomicrografia das partículas primárias com diferente grau de arredondamento e superfície. Tipos de grau de arredondamento: (Ar) – Arredondado; (SAr) – Subarredondado; (SAg) – Subanguloso e (Ag) – Anguloso. Tipos de superfícies: (CLs) – Liso; (CSRg) – Semi-rugoso; e (CRg) – Rugoso.

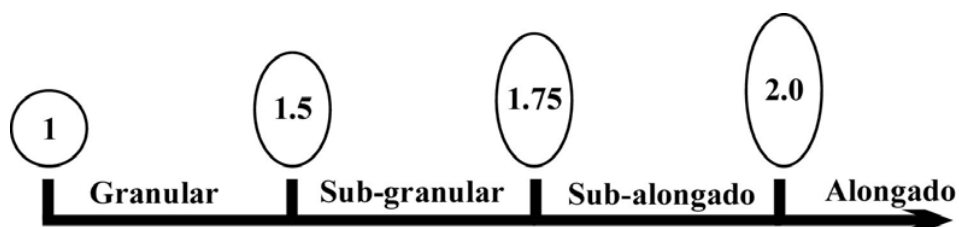


FIGURA 02 – Esquema mostrando a razão comprimento/largura; critério utilizado para a determinação do grau de alongação das partículas primárias.

(a) *Granular*: $C/L < 1,50$

- (b) *Subgranular*: $1,50 > C/L < 1,75$
- (c) *Subalongado*: $1,75 > C/L < 2,00$
- (d) *Alongado*: quando $C/L > 2,00$

As formas dos cristais dependem tanto do seu sistema cristalográfico, quanto das condições que prevaleceram durante sua formação. Os minerais serão descritos de acordo com o tipo de contato entre os cristais, sugerindo o grau de cristalinidade e tipo de superfície interna (observado pela superfície exposta dos cristais nas seções polidas) (FIGURA 03).

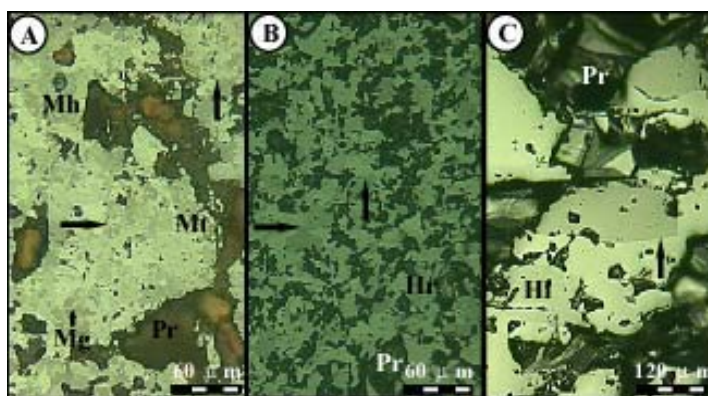


FIGURA 03 – Critério utilizado para definição do grau de cristalinidade de um cristal. A superfície de contato entre os cristais pode ser (as setas pretas indicam os tipos citados): (A) Tipo Interdigitado; (B) Tipo Irregular; e (C) Tipo Reto. Fotomicrografias de luz polarizada. Hr – Hematita granular; Hl – Hematita lamelar; Mg – Magnetita; Mh – Mineral Hidratado; Mt – Martita e Pr – Poro.

Os cristais dos minerais, baseados na definição de suas faces cristalinas, podem receber as denominações abaixo:

- (a) *Euédrica*: minerais apresentam suas faces cristalinas bem definidas, ou seja, contornos e bordas retas (contato entre as faces cristalinas de cada cristal, formando poliedros e com pontos tríplexes), indicam serem minerais bem cristalizados. Essas características indicam que os cristais tiveram tempo para sua cristalização e que o processo de cristalização desses cristais atingiu o ponto de equilíbrio;
- (b) *Subeuédrica*: minerais apresentam apenas parte de suas faces cristalinas bem definidas, ou seja, contornos e bordas irregulares a retas;

(c) *Anédrica*: minerais não apresentam suas faces cristalinas bem definidas, ou seja, contornos e bordas irregulares a interdigitados entre si, indicando que não houve tempo suficiente de cristalização e que o processo de cristalização não se encontrava em equilíbrio, gerando cristais com baixo grau de cristalinidade.

Os cristais dos minerais de ferro podem ocorrer na forma agregada ou como cristais isolados, dispersos dentro dos agregados de outros minerais ou nos poros. São considerados agregados de cristais quando apresentarem dois ou mais cristais de um mesmo mineral formando uma matriz.

A porosidade pode ser dividida em dois tipos: uma interna e outra externa (FIGURA 04). A porosidade interna é aquela presente dentro dos cristais de minerais de ferro, geralmente formada por pequenos poros. E a porosidade externa é aquela presente entre os cristais de minerais, cujos poros podem ser pequenos a muito grandes, podem estar alinhados ou não.

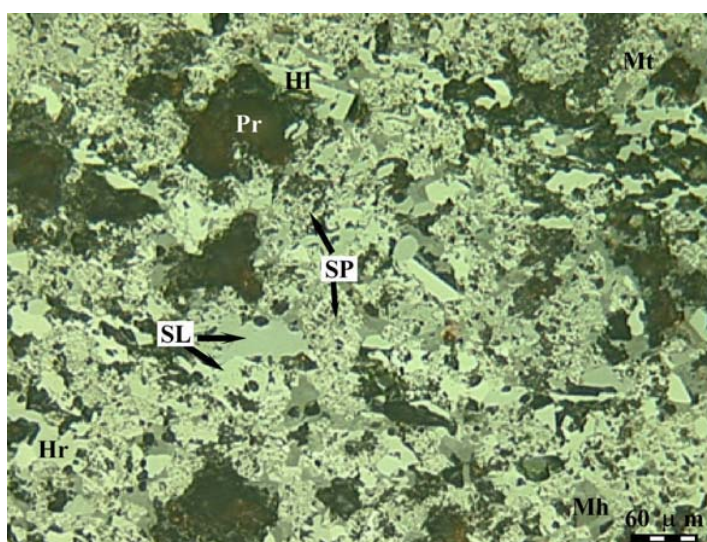


FIGURA 04 – Tipos de superfície que os cristais podem apresentar. (SL) Superfície Lisa e (SP) Superfície Porosa, como indicado pelas setas. (Fotomicrografia de luz polarizada).

Os cristais dos minerais de ferro podem apresentar superfície porosa ou lisa. Os minerais apresentam superfícies porosas quando têm pequenos poros na sua superfície. Esses poros geralmente são gerados durante o processo de transformação de um mineral para outro, como ocorre, por exemplo, na transformação da magnetita para martita. Os minerais apresentam superfícies lisas

quando apresentam superfície homogênea e límpida, como os cristais de hematita lamelar.

As partículas primárias estudadas apresentam graus variáveis de porosidade, que dependem do tipo de minério. Os poros podem estar concentrados em bandas ou em porções granulares, dispersas dentro da matriz mais compacta ou formando uma matriz porosa com porções mais compactas dispersas ou simplesmente formando partículas primárias porosas. Geralmente, os poros apresentam um contato interdigitado com os minerais, também podem ser encontrados cristais dispersos dentro dos poros.

O tamanho e a forma dos poros variam de acordo com o tipo de minério, mas está intimamente associado à mineralogia presente. Geralmente, o tamanho dos poros pode ser correlacionado a alguns minerais: quando há a transformação da magnetita para martita, ocorre a geração de microporos na superfície da martita; os poros maiores ocorrem em maior quantidade quando há a presença de minerais hidratados nas partículas primárias.

A forma dos poros também varia com o tipo de mineralogia associada, ou seja, com minerais de hematita lamelares, os poros tendem a ser mais alongados e contorno mais rugoso; enquanto que com minerais granulares, os poros tendem a serem mais granulares, tamanhos variados e contorno mais suave.

I.2.3 – CONDIÇÕES PARA O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

O presente trabalho visa a conhecer o comportamento dos diferentes tipos de minérios. As condições experimentais utilizadas nos testes de sinterização dos minérios estudados terão os padrões em uso pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas. Os estudos de novos minérios, geralmente passam pelos procedimentos descritos a seguir.

Os procedimentos adotados para o estudo das amostras foram os seguintes: (i) preparação dos minérios – classificação granulométrica e determinação da composição granuloquímica; (ii) determinação da composição das misturas – definição das quantidades de fundentes, combustíveis, finos de retorno, etc; (iii) determinação da umidade ótima – realização de testes de microaglomeração para obtenção da melhor umidade para a mistura; (iv) realização dos testes de sinterização – queimas das misturas na panela; e, (v) os testes de qualidade – produto sinter submetido aos testes de sinterabilidade.

As amostras de *sinter feed* de cada tipo de minério foram separadas por faixa granulométrica, sendo retiradas alíquotas (amostras menores) de cada faixa para serem analisadas quimicamente, pelo método de via úmida. Os teores dos seguintes compostos foram obtidos: Fe(t), FeO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, MnO, TiO₂, P₂O₅, K₂O, Na₂O, ZnO, S e perda ao fogo (TABELA 01 – ANEXO I). As mesmas faixas foram analisadas por difração de raios X, realizadas no difratrômetro de marca JEOL 2000, obtendo-se a caracterização dos minerais de ferro, bem como dos minerais de ganga.

O enfoque do presente estudo visa a conhecer o comportamento dos diferentes tipos de minérios. Assim, a quantidade de combustível, fundentes, adições e finos de retorno e os parâmetros operacionais são fixos e previamente determinados, de forma a obter as mesmas condições nos diferentes níveis de queimas.

Os parâmetros para a composição química da mistura a ser sinterizada foram definidos da seguinte maneira: basicidade (CaO/SiO₂ ~ 1,70); MgO ~ 1,45%; sílica ~ 4,90%; alumina é o que for encontrado nos minérios; FeO depende do teor de combustível; permeabilidade e combustível dependem da quantidade de finos de retorno a serem gerados.

Os minérios escolhidos para serem utilizados no presente trabalho encontram-se na TABELA 02, distribuídos em 19 níveis de queimas. Na TABELA 03 tem-se a distribuição granulométrica das subfrações estudadas, com as proporções de cada subfração na mistura. E a TABELA 04 apresenta as proporções e a granulometria dos insumos utilizados nos testes de sinterização realizados.

O passo seguinte é a definição do grau de umidade necessária a ser adotado nos testes de sinterização. Esse passo é fundamental para os testes de

sinterização, visto que o tamanho dos grânulos e a sua resistência refletem na maior permeabilidade do leito durante as queimas.

Nível de queima	N01	N02	N03	N04	N05	N06	N07	N08	N09	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19
Nucleante	B	M1	M2	M3	M4	M5	M6	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Intermediário	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Aderente	B	B	B	B	B	B	B	M1	M2	M3	M4	M5	M6	B	B	B	B	B	B

Os minérios são: M1 – hematítico microcristalino (HI 0348); M2 – hematítico martítico (GI 0358); M3 – hematítico martítico hidratado (GI 0166); M4 – hematítico granular (GI 0165); M5 – hematítico (GI 0137); M6 – hematítico lamelar ou especular (GI 0164); Blendado – M1+M2+M3+M4+M5+M6 (mistura dos minérios em proporções iguais); SU - Sinter Industrial da USIMINAS.

TABELA 02 – Tabela com o programa de execução das queimas das misturas, divididas por etapas. Os níveis (01 a 07) minérios estudados como subfração nucleante; níveis (08 a 13) minérios estudados como subfração aderente e níveis (14 a 19) minérios estudados como subfração intermediária.

SUBFRAÇÃO	FAIXA GRANULOMÉTRICA (mm)	SUBFRAÇÃO (%)	SUBFRAÇÃO TOTAL (%)
NUCLEANTE	9,52-5,00	5,0	
	5,00-2,83	20,0	
	2,83-1,00	25,0	
	Subtotal		50,0
INTERMEDIÁRIA	1,00-0,50	9,0	
	0,50-0,25	6,0	
	Subtotal 2		15
ADERENTE	0,25-0,105	10,0	
	< 0,105	25,0	
	Subtotal 3		35
TOTAL		100	100

TABELA 03 – Tabela com a distribuição granulométrica das diferentes frações de *sinter feed*, adotada nesse trabalho.

A determinação da umidade ideal da mistura a sinterizar é feita experimentalmente, através de queimas de misturas com diferentes teores de umidade para um nível constante de combustível. A quantidade de água adicionada será ideal, quando obtiver o sinter com produtividade elevada sem prejuízo de sua resistência mecânica. A determinação da umidade ideal foi realizada, mantendo os

parâmetros da composição química acima, para cada tipo de mistura diferente, sendo testados umidades que variaram de 4% a 7%.

A cada teor de umidade, as micropelotas geradas são amostradas e passam pelo processo de peneiramento. As micropelotas são peneiradas e separadas por faixas granulométricas e submetidas a uma avaliação de sua distribuição granulométrica. O procedimento deste método encontra-se descrito no Anexo 3 da dissertação de mestrado de PIMENTA (1992). Cada faixa granulométrica de micropelotas teve as mesmas desagregadas e peneiradas novamente, apresentando assim, uma distribuição das diferentes subfrações do minério que contribuíram para a geração de cada faixa granulométrica de micropelotas.

Proporções	> 2,83	2,83	2,83 – 1,00	1,00 – 0,25	< 0,25	< 0,10
COQUE	-	40%	-	35%	25%	-
CALCÁRIO	35%	-	39%	11%	15%	-
DOLOMITA	-	45%	-	35%	20%	-
QUARTZO	-	-	-	-	-	100%

TABELA 04 – Tabela com as proporções de cada granulação do combustível, fundentes e adições, utilizados nos testes em escala piloto do presente estudo.

I.2.3.1 – Testes de Sinterização

A metodologia de simulação em escala piloto do processo de sinterização industrial (ensaio de sinterabilidade) é definida de modo a garantir, para uma mesma mistura, os seguintes aspectos:

- A produção de sínteres com características químicas e metalúrgicas semelhantes ao produzido industrialmente;
- A obtenção de índices de produtividade de mesma ordem de grandeza;

- A reprodução, em escala industrial, das tendências observadas nos testes em escala piloto.

No ensaio de sinterabilidade são realizadas duas queimas para obtenção de finos de retorno e três queimas normais para cada condição testada. As condições de controle foram: (i) todos os bolos de sinter de uma determinada condição de teste, devem produzir, após a degradação, a mesma percentagem de finos de retorno; (ii) as queimas individuais não devem exibir uma divergência superior a 1:30 minutos no tempo de sinterização; e (iii) os pesos das misturas carregadas, não devem apresentar entre si diferença superior a 1,5 kg.

A percentagem de finos de retorno praticada corresponde a 25 % da mistura total, sendo sua granulometria composta por 25 % de material na faixa de 5 a 10 mm e 75 % de 0 mm - 5 mm, valores estes que correspondem a granulometria dos finos de retorno industrial da Usiminas.

A quantidade de combustível utilizada é a necessária para balancear os finos de retorno, ou seja, aquela que garante que a quantidade de “finos de retorno produzido” será igual à quantidade de “finos de retorno introduzido” na mistura correspondente, com uma determinada tolerância (10% em relação à fração < 5,0 mm).

A umidade ótima de cada mistura é previamente determinada. Neste caso, determina-se, para aquela mistura em teste, a umidade que resulte na melhor produtividade e os melhores índices de qualidade do sinter.

Os parâmetros básicos dos ensaios na Máquina Piloto de Sinterização e do sistema de carregamento da mistura, utilizados no estudo, foram:

- Diâmetro médio da panela = 300 mm;
- Altura da camada = 530 mm (mistura + *bedding*), sendo *bedding* = 20 mm;
- Pressão de sucção durante a queima = 1600 mm H₂O e durante a ignição de 600 mm H₂O;
- Tempo de ignição = 1 minuto;
- Intensidade de ignição = 25.000 kcal/m²/min (COG);
- Umidade visada nas misturas = umidade ótima previamente determinada;

- Relação ar/gás na ignição = 5/1;
- Combustível sólido: 50% de coque fino Usiminas e 50% de antracito da África do Sul;
- Utilização do segregador piloto (simulador do ISF industrial) no carregamento das misturas na panela.

A mistura definida para cada condição de teste é preparada em um tambor misturador com um tempo total de misturamento de 8 minutos, sendo que a água para ajustar a umidade ideal é adicionada em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Após o misturamento, a mistura é carregada na panela por meio de um dispositivo que elimina o problema de segregação de variações na densidade de carregamento.

Após a obtenção dos sinteres resultantes dos três bolos, todo o material é homogeneizado, fazendo-se uma análise granulométrica e amostrada para análise química e para os testes físicos e físico-químicos, conforme pode ser visto na FIGURA 05.

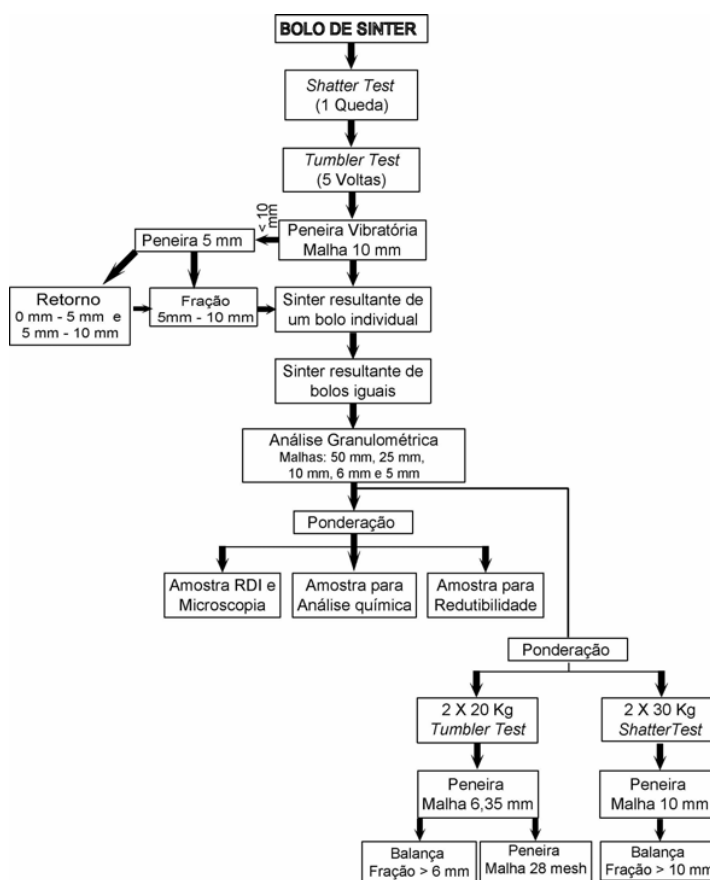
I.2.3.2 – Testes de Avaliação da Qualidade do Sinter

Na avaliação do sinter gerado para cada nível, será utilizado o procedimento de rotina adotado pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas. Na FIGURA 05 tem-se o procedimento adotado para avaliação do sinter gerado.

Os métodos desenvolvidos para testar a qualidade do sinter variam de uma usina para outra, apresentando metodologias e resultados diferentes. Esses métodos encontram-se em constante desenvolvimento, buscando sempre um melhor desempenho do processo siderúrgico e a ampliação dos tipos de minérios a serem utilizados.

I.2.3.2.1 – *Composição Química*

O sinter produzido deve apresentar alto teor de ferro sob a forma de hematita, magnetita ou wustita, baixo teor de SiO_2 e a basicidade binária, dada pela razão CaO/SiO_2 na faixa de 1,1 - 1,4.



Observação: da fração > 5mm, é incorporada ao retorno a quantidade necessária para se obter um retorno com 25% de 5 mm - 10 mm. O restante da fração > 5mm é reincorporado ao sinter resultante.

FIGURA 05 – Fluxograma de tratamento do bolo de sinter e preparação de amostras para caracterização física e metalúrgica, em escala piloto na Usiminas (PIMENTA et al., 2000).

A tendência atual tem sido a produção do sinter com constituintes necessários à produção do ferro-gusa. O MgO , CaO e SiO_2 , que eram antes

carregados no alto-forno, passaram ser adicionados no processo de sinterização. Essas adições auxiliam na produção de sinteres mais resistentes, visto que a força de coesão do sinter é resultado das ligações de escórias produzidas pela adição desses compostos com grãos de óxidos de ferro.

Apesar de ocorrer uma diminuição no teor de ferro no sinter, as adições acima citadas, melhoram a resistência do sinter gerado, além de diminuir as adições, fundentes e combustíveis nos altos-fornos.

1.2.3.2.2 – *Caracterização Mineralógica e Microestrutural do Sinter*

A caracterização mineralógica e microestrutural dos sinteres piloto foram realizados no Analisador Contínuo de Fases (*Quantimet*), no Laboratório de Análise Mineralógica e Microestrutural de Sinter e Minério de Ferro do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas. Os sinteres obtidos foram submetidos a uma análise quantitativa das diferentes fases minerais presentes e observadas algumas correlações. Parte dos dados semiquantitativos das fases minerais e poros presentes nos sinteres obtidos foi incluída no presente estudo.

A caracterização mineralógica do sinter consta da descrição das diferentes fases minerais presentes nos sinteres, bem como da sua distribuição nos mesmos. As diferentes fases minerais encontradas e descritas nos sinteres são: hematita, magnetita, ferritos de cálcio e silicatos de cálcio e sua porosidade total (poros abertos e fechados).

A estrutura do sinter é vista, como o principal meio, para explicar a natureza e a intensidade das variações experimentadas pelo sinter, cujas causas estão associadas ao tipo e quantidade de fases minerais presentes no aglomerado.

1.2.3.2.3 – *Granulometria*

A faixa granulométrica do sinter considerada ótima, para os altos-fornos, é entre 5 mm - 50 mm. Para atingir esta faixa o bolo de sinter é submetido a tratamento mecânico, com o peneiramento em série.

As frações abaixo de 5 mm são consideradas finos de retorno e voltam ao processo de sinterização. As frações acima de 50 mm são britadas, até atingir a faixa de 19 mm - 20 mm e estas vão para o alto-forno.

Apesar dessa separação, aproximadamente 4 % da fração, abaixo de 5 mm, também vai para o alto-forno, parte devido à ineficiência das peneiras e parte gerada pela degradação por manuseio ou estocagem.

1.2.3.2.4 – Caracterização Física

Os sinteres gerados foram caracterizados quanto às resistências ao impacto e à abrasão, realizados no sentido de reproduzir as condições de manuseio do sinter até sua utilização nos altos-fornos.

O teste de queda é utilizado para qualificar a resistência do sinter em relação ao impacto. Os testes foram executados segundo a Norma JIS M 8711, que estabelece o seguinte procedimento:

- Amostra: 30.000 g compostas do sinter gerado com a granulometria acima de 10 mm;
- Número de quedas: 4;
- Resultado: porcentagem retida na peneira de 10mm.

O teste de tamboramento foi feito para testar a resistência à abrasão do sinter durante o manuseio. Os testes foram executados segundo a Norma ASTM E-279-92 que estabelece as seguintes condições:

- Amostra 20.000 g compostas do sinter gerado com a granulometria, incluindo fração de 6 mm - 10 mm;
- Número de revoluções: 200;
- Resultado: porcentagem retida na peneira de 6,35 mm.

I.2.3.2.5 – Caracterização Metalúrgica

Os ensaios de RDI (Índice de Degradação sob Redução) e redutibilidade são ensaios tradicionais, realizados nesta etapa do processo. Esses ensaios são de grande importância, pois indicam o comportamento da carga metálica na zona de preparação do alto-forno. O RDI indica a geração de finos durante a redução da carga e a redutibilidade indica a capacidade de ceder oxigênio para o gás redutor e está diretamente relacionada ao seu comportamento na zona coesiva¹.

Os testes de RDI são realizados de acordo com a Norma utilizada em ensaios da N.S.C e apresenta os seguintes procedimentos:

- Amostra 500 g na granulometria de 16 mm - 20 mm;
- Temperatura de redução: 500 °C (para minério: 550 °C);
- Tempo de aquecimento: 30 minutos
- Tempo de redução: 30 minutos
- Tempo de resfriamento: 10 minutos com a retorta dentro do forno e 10 minutos com a retorta fora do forno;
- Composição do gás redutor: 30 % CO e 70 % N₂;
- Vazão do gás: 15NI/minuto;
- Resultado: % < 2,83 mm após 900 voltas em um pequeno tambor e 5 minutos de peneiramento no RO-TAP.

Os testes de redutibilidade foram executados segundo a Norma: JIS M 8713 e apresenta os seguintes procedimentos:

- Amostra 500 g na granulometria de 16 mm - 20 mm;
- Temperatura de teste: 900 °C;
- Tempo de aquecimento: 120 minutos
- Tempo de redução: 180 minutos

¹ Zona coesiva – região do alto-forno onde os componentes da carga metálica e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem.

- Composição do gás redutor: 30% CO e 70% N₂;
- Vazão do gás: 15NI/minuto;
- Resultado: porcentagem de perda de peso de oxigênio.

A intensidade de redução a que a carga é submetida tem papel decisivo no processo de início de amolecimento. Portanto, é fundamental para o entendimento do comportamento da carga metálica a altas temperaturas, denominada redutibilidade a 1000 °C (RI₁₀₀₀).

O conhecimento do grau de redução, momentos antes de ter início o processo de amolecimento, somente é possível, através da interrupção do ensaio de amolecimento e fusão a 1000 °C, que é a temperatura que precede o início de amolecimento e, por diferença de peso, estima-se o grau de redução neste momento, representado por RI₁₀₀₀.

O ensaio de redutibilidade, portanto, difere do ensaio de amolecimento e fusão apenas na temperatura máxima, que no caso do ensaio de amolecimento e fusão é de 1650 °C. A granulometria das amostras utilizadas nos ensaios de redutibilidade a 1000 °C e nos ensaios de amolecimento e fusão foi de 9,52 mm a 12,7 mm. As condições termoredutoras deste ensaio são mostradas na TABELA 05, comparativamente ao ensaio de amolecimento e fusão.

1.2.3.2.6 – *Propriedades a Altas Temperaturas*

Nesta fase, objetivou-se avaliar as características de amolecimento e fusão dos diferentes sínteres quando submetidos a condições termoredutoras semelhantes às encontradas no interior do alto-forno (TABELA 05). O ensaio permite o monitoramento contínuo da contração do leito e da perda de pressão do gás, desenvolvido no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas.

Os parâmetros escolhidos para a caracterização do comportamento da carga metálica a altas temperaturas e das variáveis que as influenciam foram: Temperatura de início de amolecimento (T_A); Temperatura de início da fusão redutora (T_S); Temperatura de fim de fusão (T_F); Estimativa da espessura da zona coesiva (ΔT_{AF}); Quantidade de material residual (%R); Deslocamento total do

êmbolo (Δh); e Área sob a curva de perda de pressão do gás (S).

A T_A é definida como a temperatura na qual a contração do leito atinge 10% da altura inicial da carga metálica.

Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min.)	Composição do Gás Redutor (% vol.)		
		CO	N ₂	H ₂
~ 200	10	-	100	-
200 - 600	10	30	70	opcional
600 - 900	5	30	70	opcional
900 - 1200	2	30	70	opcional
1200 - 1650	5	30	70	opcional

* vazão de gás redutor de 7 NI/min.
 ** no ensaio de RI₁₀₀₀ o teste é interrompido a 1000 °C.

TABELA 05 – Condições termoredutoras utilizadas nos ensaios de redutibilidade (RI₁₀₀₀) e de amolecimento e fusão.

A T_S é a temperatura que corresponde ao início da elevação brusca da perda de carga do gás. Neste ponto, a fase líquida constituída predominantemente por FeO penetra na camada de coque, dando início à redução direta da wustita líquida.

A T_F é definida como a temperatura na qual a perda de pressão do gás retorna aos valores iniciais, ao mesmo tempo em que a contração da amostra é completada, ou seja, atinge 100%. Nos testes em que um dos fatores não seja satisfeito, retorno da perda de pressão e contração total da amostra, a temperatura de fim de fusão será definida por apenas um deles.

A ΔT_{AF} é uma estimativa feita com base na diferença entre as temperaturas correspondentes ao fim de fusão e ao início de amolecimento da carga metálica sob avaliação. Quanto maior este gradiente, maior será a espessura da zona coesiva resultante, a se considerar a carga como constituída apenas pela matéria-prima individual.

O índice % R representa a proporção (%) de material carregado que não gotejou durante o ensaio de amolecimento e fusão, permanecendo retido no interior do cadinho.

O índice Δh representa a contração total do leito (mm), ou seja, relaciona-se à intensidade de amolecimento e fusão do material.

O índice S representa a perda de carga acumulada do gás durante o ensaio de amolecimento e fusão, ou seja, é um indicador da permeabilidade global do leito durante o ensaio.

II – MINÉRIO DE FERRO

O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre. A percentagem média na crosta é de 5,0 % e ocorre como constituinte majoritário ou minoritário em todas as classes minerais. Essa diversidade existe, devido a sua abundância e alta capacidade de oxidar ou reduzir conforme o ambiente. Mais de 400 minerais apresentam Fe em teores detectáveis, cujas concentrações variam de menos de 1 % a mais de 70 %.

Apesar da ampla distribuição dos minerais de ferro, apenas poucas classes minerais são consideradas economicamente exploráveis. Isso ocorre pela quantidade de ferro presente nesses minerais ou pela concentração desses minerais nas rochas, que formam os corpos de minérios.

Os minérios de ferro considerados economicamente exploráveis são agrupados de acordo com a sua composição química, nas classes: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos, sendo esta última de menor expressão econômica.

II.1 – Minerais de Ferro

Os minerais de ferro considerados economicamente exploráveis pertencem às classes acima citadas, como pode ser visto na TABELA 06. Cada classe de minerais pode ser representada por um ou mais minerais, sendo que destes, apenas os minerais de ferro da classe óxido, são explorados economicamente, nas condições atuais.

Classe	Nome mineralógico	Composição química do Mineral Puro	Teor Fe (%)	Designação Comum
ÓXIDOS	Magnetita	Fe_3O_4	72,4	Óxido ferroso-férrico
	Hematita	Fe_2O_3	69,9	Óxido férrico
		HFeO_2 – Goethita	62,8	Hidróxido de ferro
		$\text{FeO}(\text{OH})$ – Lepidocrocita	62,85	
CARBONATO	Siderita	FeCO_3	48,2	Carbonato de Ferro
SULFETOS	Pirita	FeS_2	46,5	
	Pirrotita	FeS	63,6	
SILICATOS	Fayalita	$\text{Fe}^{2+}_2(\text{SiO}_4)$	54,81	Grupo da Olivina
	Laihunite	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2(\text{SiO}_4)_2$	47,64	Grupo da Olivina
	Greenalita	$\text{Fe}^{2+}_{2,3}\text{Fe}^{3+}_{0,5}\text{Si}_{2,2}\text{O}_5(\text{OH})_{3,3}$	44,14	Grupo da Serpentina
	Grunerita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	Grupo dos Anfibólios
	Fe-antofilita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	Grupo dos Anfibólios

TABELA 06 – Principais minerais de ferro e suas classes. (POVEROMO, 1999; DEER et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com).

O atual cenário de comercialização não viabiliza os altos custos de extração dos demais tipos de minerais, visto que o preço praticado pelo mercado de minério de ferro é baixo. Apesar de serem potencialmente exploráveis, as demais classes de minerais de ferro poderão ser explorados apenas quando forem estritamente necessários, pois seu custo é inviável no mercado atual.

Na FIGURA 06 encontram-se representadas as estruturas cristalinas apresentadas pelos principais minerais de ferro. Abaixo serão descritas as

principais características dos minerais de ferro de maior ocorrência em cada classe de minerais.

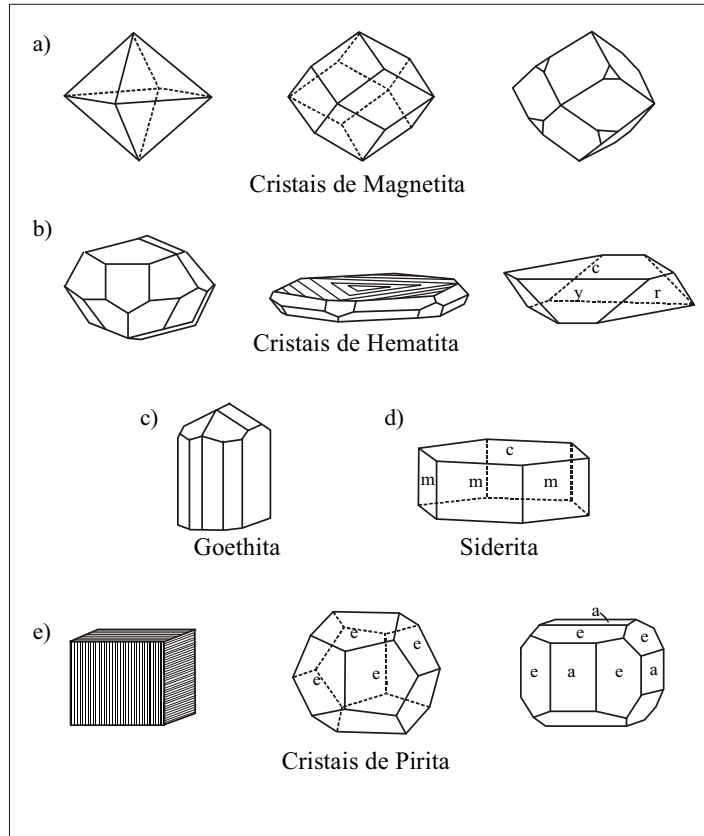


FIGURA 06 – Estrutura cristalina dos minerais de ferro. (a) Magnetita; (b) Hematita; (c) Goethita; (d) Siderita e (e) Pirita (DANA & HULBURT, 1984).

A magnetita tem a composição química de Fe_3O_4 , correspondendo a 72,36 % de ferro e 27,64 % de oxigênio; tem cor cinza a preto e densidade específica de 5,16 a 5,18 (POVEROMO, 1999; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com). É um mineral fortemente magnético, às vezes, age como magneto natural (DERR et al., 1994). A sua propriedade magnética é importante, pois auxilia na exploração por métodos magnéticos, onde a magnetita é facilmente separada, via separação magnética, da ganga produzindo um concentrado de alta qualidade (DERR et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com).

A hematita tem a composição química de Fe_2O_3 , correspondendo a 69,94 % de ferro e 30,06 % de oxigênio; é cor cinza azulado a vermelho, brilhante a fosca, podendo ser terrosa, compacta ou cristalina, com densidade específica de

5,26 (POVEROMO, 1999; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com). É o mais importante mineral de ferro, devido a sua larga ocorrência em vários tipos de rochas e suas origens diversas (DERR et al., 1994). Ocorre como mineral primário associado a depósitos de veios, rochas ígneas, metamórficas e sedimentares e também como produto de alteração da magnetita (DERR et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com).

A limonita é um nome genérico dado para os óxidos hidratados de ferro, que mineralogicamente são compostos de misturas variadas dos minerais goethita e lepidocrocita. A fórmula química da goethita é HFeO_2 contendo 62,85 % de ferro, 27,01 % de oxigênio e 10,14 % de água, com densidade específica de 3,6-4,0; sua cor é geralmente amarela ou marrom a quase preta e pode ser compacto a terroso e ocre (POVEROMO, 1999; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com). A forma da lepidocrocita é FeO(OH) , sendo identificada apenas na difração de raios-X (DERR et al., 1994). Assim utiliza-se o termo limonita para denotar óxidos não identificáveis com grau de hidratação variada (DERR et al., 1994). Geralmente, é um mineral secundário formado pelo intemperismo e ocorre associado com outros óxidos (DERR et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com).

A siderita tem a composição química de FeCO_3 que corresponde a 48,20 % de Fe, 37,99 % de CO_2 e 13,81 % de oxigênio, densidade específica de 3,83-3,88; sua cor varia de: branco a cinza esverdeado a marrom (POVEROMO, 1999; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com). Esse mineral pode conter quantidades variáveis de cálcio, magnésio e manganês (DERR et al., 1994). Os minérios com siderita são denominados de minério de ferro “spathic” ou minério banda preta, geralmente são calcinados antes de serem introduzidos nos altos-fornos (DERR et al., 1994). Eles contêm quantidade suficiente de cal e magnesita para serem auto-fluxantes (DERR et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com).

A pirita é também conhecida como “ouro dos bobos” devido a sua cor amarelada, tem a composição química de FeS_2 que corresponde a 46,55 % de Fe e 53,45 % de S; sua densidade média é de 5,01; dureza de 6,5, brilho metálico, quando aquecido apresenta propriedades magnéticas (DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com). A pirita é o mineral mais abundante entre os sulfetos, além de ter uma ampla ocorrência, pode ser encontradas em grandes maciços ou veios de origens hidrotermais, tanto como mineral primário como secundário em rochas

ígneas e sedimentares (DEER et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com).

A pirrotita é um mineral com a seguinte composição química $Fe_{(1-x)}S$, com 62,33 % de Fe e 37,67 % de S; apresenta coloração vermelho amarelada, tons de bronze, densidade média de 4,51; brilho metálico e fortemente magnética, também denominada de pirita magnética (DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com). Apesar de sua ampla ocorrência em rochas ígneas e metamórficas, a sua maior ocorrência está associada principalmente às rochas ígneas básicas (DEER et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com).

Os minerais, que são denominados silicatos de ferro quando apresentam altos teores de Fe na sua estrutura cristalina, cujos teores variam de 54,81 % a 39 % ou menos de Fe presente (DEER et al., 1994; DANA & HULBURT, 1984; www.webmineral.com). Apesar desses altos teores, esses minerais não são utilizados para exploração comercial do Fe, por se encontrarem dentro da estrutura cristalina dos minerais e também pela sua forma de ocorrência, que é de forma dispersa ou zonas dentro da rocha, tornando difícil sua extração e posterior beneficiamento. A olivina é um mineral rico em ferro, mas seu uso no processo siderúrgico como fundente é para controlar a basicidade do sinter, ou seja, é utilizada mais pelo seu teor de Mg do que de Fe, sendo que a olivina mais utilizada é a variedade rica em Mg, a forsterita.

II.2 – Minério de Ferro

O minério de ferro é uma das matérias-primas de uso mais antigo e

desde a sua descoberta, durante o Período Neolítico, tem aumentado o seu leque de aplicação.

A extração de ferro teve grande impulso no início do século XIX, após a descoberta da utilização do carvão mineral, permitindo a produção do ferro-gusa em grande escala (ABREU, 1973). Hoje, é um produto essencial para a indústria moderna, visto que a indústria do aço continua a ser a espinha dorsal do desenvolvimento industrial de um país. O consumo de minério de ferro ainda é considerado como índice de industrialização de um país (GROSS, 1993).

A produção mundial do minério de ferro é bem distribuída entre os continentes (FERREIRA, 2001 e QUARESMA, 2002). No entanto, poucos países concentram as maiores jazidas, sendo que cinco países detêm 77 % das reservas totais (TABELA 07) (BDMG, 2002). Apesar da Rússia, Ucrânia e China terem os maiores depósitos e que representam metade do total mundial, os seus minérios são de baixos teores, ao considerar o teor médio do minério, a China e a Austrália invertem de posição (BDMG, 2002).

País	Reservas (10⁹ de t)	Minério contido (10⁹ de t)	Teor Médio (% de Fe)
Rússia	56,0	31,0	55,4
Ucrânia	50,0	28,0	56,0
China	50,0	15,0	30,0
Austrália	40,0	25,0	62,5
Brasil	19,0	12,0	63,2
Cazaquistão	19,0	10,0	52,6
Estados Unidos	15,0	4,6	30,7
Suécia	7,8	5,0	64,1
Índia	6,2	3,9	62,9
Canadá	3,9	2,5	64,1
África do Sul	2,3	1,5	65,2
Mauritânia	1,5	1,0	66,7
Outros	38,0	23,0	60,5
TOTAL	310,0	160,0	51,6

Fonte: U. S. Geological Survey

TABELA 07 – Reservas mundiais de minério de ferro por país em 2001 (BDMG, 2002).

Os depósitos australianos e brasileiros são importantes, tanto pelo seu volume, quanto pelos teores médios de seus minérios, que são superiores a 62

% de ferro, contra os 51,6 % verificados pela média mundial (BDMG, 2002). As vantagens das reservas brasileiras devem-se as suas características tecnológicas naturais, cujas jazidas são de fácil extração, produzindo grandes volumes a custos baixos (FERREIRA, 2001).

As reservas mundiais de minério de ferro (medidas + indicadas) estão na ordem de 310 bilhões de toneladas, cuja produção mundial na última década, tem-se mantido num patamar em torno de 850 a 950 milhões de toneladas (TABELA 08). Se for mantido o ritmo de produção atual, as reservas mundiais serão exauridas em aproximadamente 310 anos, enquanto que as reservas brasileiras levariam apenas 95 anos (BDMG, 2002).

País	1997	1998	1999	2000	2001
Brasil	188,0	183,1	188,7	208,8	208,7
Austrália	165,0	163,3	153,0	171,3	181,0
China**	123,1	97,1	92,2	99,9	102,0
Rússia	70,9	72,3	81,9	86,6	82,5
Índia	69,4	71,7	70,2	76,0	79,2
Ucrânia	53,4	51,1	47,1	55,7	54,7
Estados Unidos	63,0	62,9	57,8	63,1	45,8
África do Sul	33,2	33,0	29,5	33,7	34,8
Canadá	38,2	38,7	34,0	35,9	27,9
Suécia	21,9	20,9	18,9	20,6	19,5
Outros	97,0	91,2	90,1	98,7	95,0
TOTAL	923,1	885,3	863,4	950,3	931,1

Fonte: UNCTAD (*United Nations Conference on Trade and Development*)

(*) dados preliminares;

(**) ajustado para equalizar a produção média mundial de teor contido de ferro.

TABELA 08 – Produção mundial de minério de ferro por país, de 1997-2001 (em milhões de toneladas) (BDMG, 2002).

Na última década, houve uma variação nas regiões produtoras e consumidoras de aço (FIGURA 07). Na FIGURA 07 a comparação do consumo e produção do aço nos países amostrados: observa-se um crescimento do consumo e produção de aço na China e uma queda considerável na Ex-USSR e no Japão (em menor escala).

O comércio global de minério de ferro demonstra que os países que mais produzem minério de ferro não são os seus maiores consumidores, como pode ser visto na TABELA 09, onde mostra o comércio de minério transoceânico.

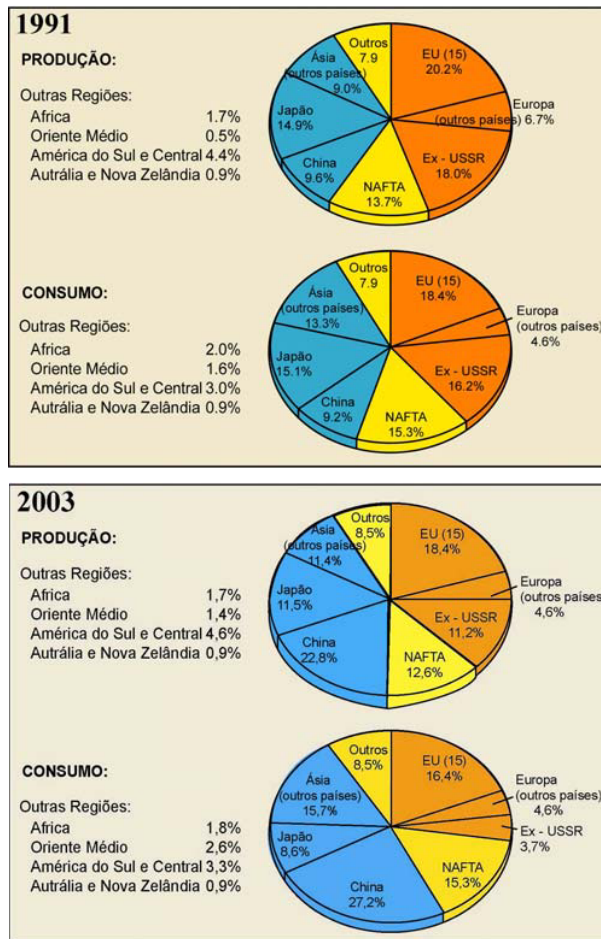


FIGURA 07 – Gráficos com a produção e consumo de aço nos anos de 1991 e 2003 (<http://www.worldsteel.org>). (EU – União Européia; NAFTA – Estados Unidos, Canadá e México; Ex-USSR – Antiga União Soviética).

II.2.1 – MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL

No Brasil, a partir da década de 40, o consumo interno de minério de ferro consistia de fornos de gusa, os quais eram abastecidos pela SAMITRI e

Belgo-Mineira. Nessa década foi criada a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) por acordo e solidariedade aos países aliados, para exportação do minério aos aliados da 2ª Grande Guerra Mundial (PEREIRA, 1987).

Destino	Região Exportadora									Total de Importação	Importação Extra-regional
	União Européia (15)	Europa (outros países)	Ex - USSR	NAFTA	América do Sul e Central	África e Oriente Médio	Ásia	Oceania			
União Européia (15)	78,4	11,6	7,0	0,2	1,4	1,6	2,4	0,2	102,8	24,4	
Europa (outros países)	14,0	4,2	7,3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	25,8	21,7	
Ex - USSR	0,8	4,4	4,5	0,0	0,0	0,0	0,1	-	9,9	5,4	
NAFTA	5,5	2,7	2,4	7,0	10,3	1,0	8,3	0,8	38,0	31,0	
América do Sul e Central	1,9	0,5	1,7	1,7	5,0	0,2	1,9	0,0	12,9	7,9	
África e Oriente Médio	5,0	4,1	10,9	1,9	2,6	3,0	3,0	0,0	30,6	12,3	
China	1,1	0,9	7,8	0,1	0,5	0,6	18,1	0,2	29,3	44,5	
Japão	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	0,0	3,2	3,2	
Ásia (outros países)	2,7	2,2	15,6	0,2	3,3	1,5	43,9	0,6	74,2	53,3	
Oceania	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,3	0,3	1,9	1,6	
Total de Exportação	109,7	30,7	57,2	11,3	23,2	8,1	86,2	161,5	328,6	205,4	
Exportação extra-regional*	31,3	26,6	52,7	4,3	18,2	5,1	65,4	158,7	205,4		
Rede de exportação (exportação-importação)	6,9	4,9	47,3	-26,8	10,3	13,3	-29,7	0,3			

* excluindo comércio intra-regional

TABELA 09 – Distribuição e balanço do comércio dos minérios de ferro entre os países produtores e importadores em 2003. (<http://www.worldsteel.org>).

A partir da década de 50, o Brasil iniciou o desenvolvimento do perfil de país exportador de minério de ferro, após a consolidação da CVRD como grande empresa de mineração, com remodelamento da estrada de ferro Vitória-Minas (EFVM), mecanização das minas e o aparelhamento dos cais de embarque do minério em Vitória (ES) (FERREIRA, 2001).

Nas décadas de 50 e 60, ocorreu também um aumento no consumo interno do minério, devido à construção das grandes usinas siderúrgicas, como

MANESMANN (1954); USIMINAS (1962), COSIPA (1965) e CSN (em 1960 produziu o 1º milhão de tonelada de aço em lingotes) (FERREIRA, 2001). As exportações foram intensificadas com a associação da SAMITRI e FERTECO à CVRD para utilização da estrada de ferro Vitória-Minas. A partir da década de 70, o Brasil consolidou-se no contexto mundial como grande produtor e exportador de minério de Ferro (FERREIRA, 2001).

Atualmente, o perfil exportador de minério de ferro brasileiro deve-se à alta qualidade do minério e também pelo sistema de escoamento da produção (FERREIRA, 2001 e BDMG, 2002), totalizando hoje, cinco corredores de exportação (BDMG, 2002), a saber:

- Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFSM) (542 quilômetros) – Porto de Tubarão – Vitória (ES), utilizado pelas empresas: CVRD, SAMITRI, FERTECO E SOCOIMEX; considerando Itabira como ponto de partida;
- Estrada de Ferro Carajás (EFC) (892 quilômetros) – Porto Ponta da Madeira (MA), utilizado exclusivamente pela CVRD;
- MRS Logística (583 quilômetros) – Porto Guaíra (RJ), utilizado pela MBR;
- MRS Logística (712 quilômetros) – Porto Sepetiba (RJ), utilizado pela FERTECO;
- Mineroduto de Mariana (396 quilômetros) – Porto Ponta do Ubu (ES), de uso privativo da SAMARCO.

O Brasil possui 6,7 % dessas reservas mundiais de minério de ferro (20,0 bilhões de toneladas), entretanto o alto teor de ferro em seus minérios (60,0 a 67,0 % nas hematitas e 50,0 % a 60,0 % nos itabiritos), leva o Brasil a ocupar lugar de destaque no cenário mundial (FERREIRA, 2001; BDMG, 2002 e QUARESMA, 2002). As reservas brasileiras estão assim distribuídas: Minas Gerais (70 %), Pará (7,3 %), Mato Grosso do Sul (21,5 %) e outros estados (1,2%) (QUARESMA, 2002).

A produção brasileira de minério de ferro, em 2001, atingiu 210,0 milhões de toneladas; está distribuída entre cerca de 30 empresas que operam 80 minas, todas a céu aberto, com utilização de 43 plantas de beneficiamento (QUARESMA, 2002). O minério bruto (hematita, com um teor médio de 60,0% de Fe e itabirito, com um teor médio de 50,0% de Fe), após o beneficiamento, gera produtos granulados (16,0 % da produção) e finos (*sinter feed* - 54,0 % da produção e *pellet-feed* - 30,0 %), com teores de ferro variando entre 65,0 % e 67,0 %

(QUARESMA, 2002).

Nessa produção de 2001, o Grupo CVRD (incluindo as minas da SAMITRI e SERRA GERAL e mais as empresas incorporadas: MBR, FERTECO e SAMARCO) produziu 88,7 % da produção de ferro brasileira, o restante é dividido entre a CSN (5,1 %), ITAMINAS (2,7 %) e diversas pequenas empresas (3,5 %) (BDMG, 2002; QUARESMA, 2002).

O consumo interno de minério de ferro, que está concentrado na indústria siderúrgica (usinas integradas e produtores independentes de ferro-gusa) e nas usinas de pelotização, foi de 86,3 milhões de toneladas, em 2001. A indústria siderúrgica consumiu 46,1 milhões de toneladas de minério e produziu 27,4 milhões de toneladas de gusa, enquanto as usinas de pelotização consumiram 40,2 milhões de toneladas de minério, para produzir 37,3 milhões de toneladas de pelotas (QUARESMA, 2002).

II.3 – Classificação e Preparação do Minério de Ferro

A prospecção e exploração do minério de ferro dependem da correlação entre os fatores geológicos, técnicos e econômicos, interligados ao modelo industrial de fabricação do aço, onde devem ser considerados os seguintes aspectos: 1) tipo de minério de ferro disponível, 2) tratamento do minério (beneficiamento); 3) processamento metalúrgico da matéria-prima (preparação da carga para a alimentação no alto-forno e processo de redução); 4) a infra-estrutura regional: sistemas de transporte, mercado e mão-de-obra disponível; e 5) mercado consumidor interno e externo (CASTRO, 1989; GROSS, 1993; HUNDERTMARK, 1996).

Muitas vezes, essa correlação é inexistente, inviabilizando, assim, a extração do minério, devido ao custo de produção muito alto, principalmente, quando há falta de um sistema de transporte eficaz e barato, sendo este último o principal componente no custo do minério (SOUZA, 1996). Atualmente, a maior parte das jazidas possui um sistema de transporte mina/ferrovia/porto para viabilizar o escoamento da produção.

O tipo de minério de ferro ofertado no mercado, foi variando ao longo do século XIX, devido à exaustão dos minérios de melhores qualidades, fazendo com que os processos metalúrgicos se adaptassem ao tipo de minério disponível.

No início do século, a dificuldade de produzir somente minério tipo granulado (*Lump ore*) e de alto teor (ideais para uso direto nos altos-fornos) foi fator fundamental, por motivos estratégicos e econômicos, para o processamento de minério de granulometria mais fina e a concentração de minério de teores mais baixos, antes de serem introduzidos nos altos-fornos.

O processamento do minério é feito através do processo de aglomeração dos minérios finos, fazendo com que estes tenham uma granulometria aceitável para seu uso em altos-fornos. Os minérios finos que, anteriormente, eram considerados rejeitos, passaram a se tornar rentáveis após serem aglomerados. Os minérios podem ser aglomerados por processos de sinterização ou pelotização.

O processo de sinterização utiliza minérios com granulometrias entre 12,5 mm a 0,15 mm, enquanto que o processo de pelotização utiliza minérios abaixo de 0,15 mm. Atualmente, 95 % do ferro primário mundial é produzido via alto-forno, sendo que no Brasil, 80 % é alimentado por sinter: daí a importância do estudo das matérias-primas utilizadas pelo processo de sinterização (SOUZA NETO et al., 1998).

O processo de aglomeração permitiu a expansão da vida útil de quase todas as jazidas de minério de ferro, com aproveitamento de minérios de granulometria mais fina (antes considerada não apropriada para os altos-fornos) e de teores mais baixos.

A tecnologia de utilização de minério de ferro é um processo que envolve desde o conhecimento do depósito do minério até a produção do ferro primário, na forma de gusa ou ferro-esponja até o seu produto final, o aço. Atualmente, grandes esforços têm sido voltados ao melhor conhecimento do minério de ferro e seu beneficiamento (SOUZA NETO et al., 1998). Esse melhor

conhecimento visa à obtenção de: (i) processos metalúrgicos melhores; (ii) maior qualidade do ferro e do aço, de acordo com as exigências do mercado; (iii) otimização das instalações; e, (iv) principalmente, um menor custo da produção (HUNDERTMARK, 1996).

O desenvolvimento da tecnologia do tratamento do minério está associado ao aumento da produção, através das técnicas de britagem, lavagem, separação magnética e peneiramento, aumentando o teor do minério e colocando o minério numa granulometria mais adequada ao processo de aglomeração.

O tratamento do minério é utilizado desde a época de Aristóteles, na Antiga Grécia, mas passou a ser intensamente utilizado a partir do século XIX, devido à Revolução Industrial. O aumento da capacidade das usinas siderúrgicas tornou-se necessário a obtenção de minérios com teores mais elevados (> 50 %), levando ao desenvolvimento do processo de tratamento de minérios (RICKETTS, 1998). As primeiras usinas de concentração operavam com jigues e com sistemas de lavagem, onde o minério limonítico passava pela lavagem (geralmente associado a argilas) e o tipo hematítico pela separação gravimétrica (por meio denso ou separação magnética) (RICKETTS, 1998).

Atualmente, o estágio em que se encontra o beneficiamento do minério, onde cada mina possui o sistema de tratamento adequado ao seu minério; a preocupação estará voltada à extração dos elementos contaminantes e à homogeneidade do produto, exigindo-se assim uma integração maior entre a geologia, mineração e metalurgia. Acredita-se que, num futuro próximo, para a produção e venda do produto sinter, dever-se-á conhecer o comportamento de cada tipo de minério, para prever a qualidade e quantidade do sinter. Ambos os fatores passam pelo desenvolvimento do tratamento de minérios que, apesar de conhecidos, poderão ser otimizados (VIEIRA et al., 2000; COSTA et al., 1998).

O minério extraído das minas passa por diversas etapas até atingir o produto final (FIGURA 08), sendo, inicialmente, classificado e beneficiado na própria mineração, seguindo processos de aglomeração até os altos-fornos na usina siderúrgica. Cada processo siderúrgico utilizado necessita de diferentes especificações do minério como pode ser visto a seguir.

II.3.1 – CLASSIFICAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO METALÚRGICO

O minério de ferro é classificado de acordo com a sua granulometria, dividido em três grandes grupos: Granulados ou Bitolados; Fino ou *Sinter* e *Pellet Feed* (FIGURA 08) (CASTRO 1989).

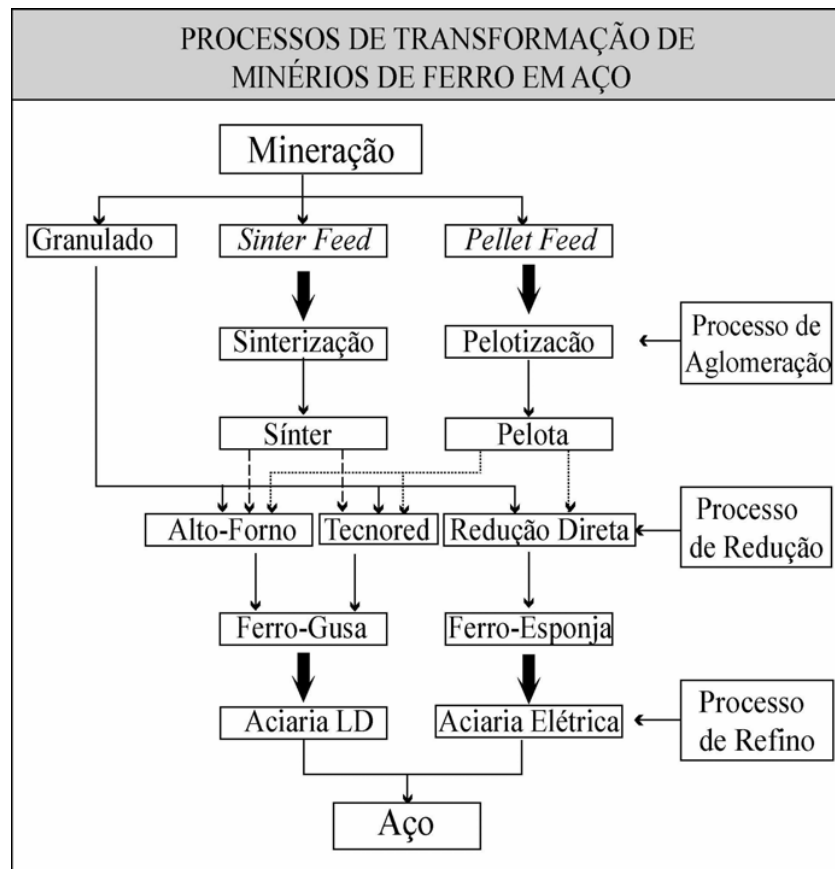


FIGURA 08 – Fluxograma das etapas percorridas do minério de ferro até a produção do aço (Modificado de ZAVAGLIA, 1995).

O minério *Run-of-mine* (ROM) é o minério bruto até 200 mm que passa por beneficiamento; o fino vai para sinterização e a fração grossa é rebitada na granulometria desejada e/ou vai direto para o alto-forno.

O minério granulado apresenta uma granulometria entre 12,5mm a 200 mm e subdivide-se em:

- *Pebble* (de 12,5 mm a 75 mm), pequena tolerância na fração < 12,5 mm, após o peneiramento, a fração grossa vai direto para o alto-forno;
- *Gravel* - (de 12,5 mm a 75 mm), permite maior percentagem de finos que o *pebble*;
- *Rubble* (de 38 mm a 50 mm), vai direto para o alto-forno; e
- *Pellet Ore ou Natural Pellet*, aceita até 10 % < 6 mm e superior até 31 mm, cujas utilizações principais são: alto-forno a coque, alto-forno a carvão vegetal e fornos de redução direta.

Finos ou sinter: são minérios de granulometria inferior a 12,5 mm e percentagem máxima na fração - 0,15 mm até 50 %. Deste modo o tamanho médio varia entre 0,15 mm até 4,0 mm. São destinados, exclusivamente, para a sinterização e, em alguns casos, a pelotização.

Pellet Feed: são minérios finos que apresentam elevada percentagem na granulometria; abaixo de 0,15 mm são chamados “superfinos”. Destina-se ao processo de pelotização em casos excepcionais e em pequena parcela, o *pellet* tem sido usado em sinterização.

II.3.2 - PREPARAÇÃO DO MINÉRIO - BENEFICIAMENTO

O minério de ferro a ser utilizado na usina siderúrgica passa, inicialmente, por processo de beneficiamento dentro da própria mineração, onde o minério que sai no estado bruto na mina (ROM), passa por processos de britagem, peneiramento e lavagem até tornar-se produto compatível com sua utilização na siderurgia ou no processo de aglomeração (CASTRO, 1989). A FIGURA 09 mostra

uma seqüência esquematizada das etapas do processo de beneficiamento do minério de ferro.

Após essas fases de preparação e classificação dos minérios nas usinas de beneficiamento das minerações, são transportados para os pátios de estocagem das usinas siderúrgicas (nacionais) ou para os portos, onde serão exportados.

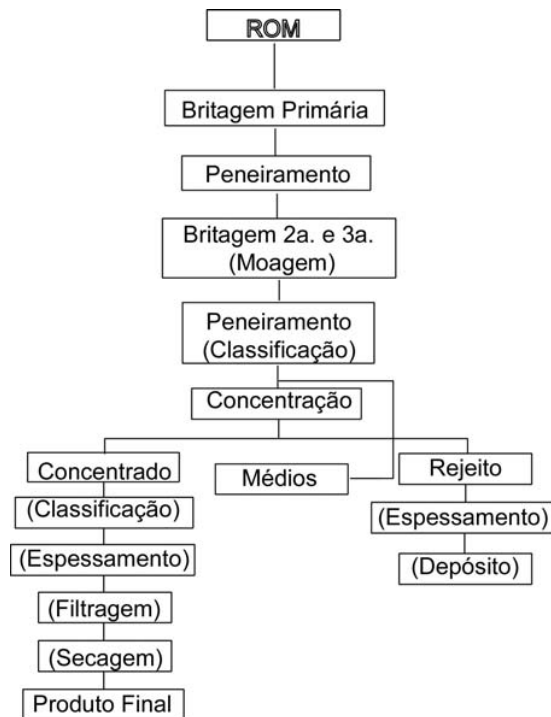


FIGURA 09 – Fluxograma geral do processo de beneficiamento de minério (CASTRO, 1989).

Nos pátios de estocagem de minério nas usinas, estes são classificados de acordo com as suas características químicas, físicas e granulométricas. A sua utilização pode ser como minério base ou de adição. Essa variação depende do tipo de sinter (no caso de *sinter feed*) ou ferro-esponja (no caso de granulados).

II.4 - Considerações sobre o Minério de Ferro

Uma jazida (depósito mineral economicamente explorável) será caracterizada como tal, quando satisfizer quatro condições básicas: volume suficiente, qualidade aceitável, mercado e infra-estrutura regional. Além de serem considerados os fatores técnicos, econômicos, também são considerados os seus aspectos políticos, sociais e estratégicos de uma jazida (CASTRO, 1989; GROSS, 1993). Como, por exemplo, o depósito de ferro de Carajás, apesar de ser considerado um dos maiores distritos minerais do mundo, somente passou à categoria de jazida após a consolidação da infra-estrutura regional, principalmente relacionada ao transporte do minério.

O minério de ferro é definido como um material natural de vários graus, composição e qualidade física. Pode ser minerado e processado, de acordo com o benefício econômico e as circunstâncias de mercado. Alguns fatores devem ser considerados para a extração do minério de ferro (GROSS, 1993):

- Tamanho e localização dos depósitos e facilidades de transporte;
- O tipo, composição química e propriedades físicas do minério adequado ao mercado;
- Comportamento do minério na concentração e beneficiamento;
- Qualidade e composição de outras matérias-primas como calcário, coque e carvão;
- O tipo de fusão e o processo siderúrgico utilizado.

O minério de ferro, além de apresentar alto teor de Fe, deve apresentar também especificações químicas e físicas, tais que possa ser facilmente concentrado. Deve conter baixos teores de Si, Al, Mg, P e CaCO₃. Apesar dos

teores máximos destes elementos variarem para cada usina siderúrgica, a quantidade total dos elementos menores e impurezas (tanto do minério de ferro, quanto dos fundentes, coque e adições) não deve exceder o limite de tolerância do processo de redução metalúrgico em uso, pois as escórias acumulam dentro do alto-forno tornando o processo metalúrgico ineficiente (GROSS, 1993).

Atualmente, algumas minas têm buscado fazer o modelamento tridimensional da jazida, visto que constitui uma poderosa ferramenta para a visualização e interpretação dos dados geológicos necessários para o planejamento das atividades de lavra, (VIEIRA et al., 2000; COSTA et al., 1998; e VERÍSSIMO, 1999). Além disso, há outras aplicações, tais como:

- ✓ O dimensionamento dos taludes (altura e inclinação) em função das direções de avanço das frentes de lavra e de suas relações com as principais estruturas presentes na jazida (e.g., foliações, contatos, zonas de cisalhamento, fraturas);
- ✓ A otimização das operações de fragmentação; corte e extração, considerando a distribuição das lentes e faixas de minérios compactos, friáveis e pulverulentos (caso de Alegria e outras minas de ferro com minérios similares);
- ✓ A programação preliminar da mistura dos minérios provenientes das diversas frentes de lavra (*run of mine*);
- ✓ A cubagem e estimativa de reservas, em associação a outros softwares de mineração que permitam cálculos de área, volume e variabilidade do depósito.

Assim tem-se que, os avanços da tecnologia e o uso de modelamento tridimensional das minas (VERÍSSIMO, 1999), a busca de um melhor conhecimento tipológico dos diferentes minérios existentes (ROSIÈRE et al., 1997). Esse conhecimento associado ao entendimento do comportamento metalúrgico de cada tipo de minério (SANTIAGO, 2000), conduz para uma integração maior entre as diferentes áreas do conhecimento relacionadas ao uso do minério de ferro.

III – GEOLOGIA

Os depósitos de minério de ferro podem ser classificados, geologicamente, em cinco categorias principais: (I) sedimentares acamadados; (ii) formados por soluções hidrotermais; (iii) relacionados a atividades vulcânicas; (iv) relacionados a processos de metamorfismo e/ou deformação, e (v) resultantes de alteração e acúmulo em superfície. Dentre estes depósitos, os sedimentares acamadados são os mais importantes, por serem os geradores dos grandes depósitos de formações ferríferas bandadas - BIF's (*Banded Iron Formation*), formados principalmente, durante o Pré-cambriano.

A formação ferrífera bandada é definida como uma rocha finamente bandada ou laminada, consistindo, principalmente, de minerais de sílica (*chert* ou seu equivalente metamórfico) e ferro (hematita, magnetita e variedades de carbonatos e silicatos) formados por precipitação química e, posteriormente, modificada por diagênese e metamorfismo (JAMES & TRENDALL, 1982; GOODWIN, 1982).

Os BIF's constituem as mais importantes de todas as classes de mineralizações ferríferas (EICHLER, 1976; JAMES & TRENDALL, 1982), pois além de formarem as maiores reservas de ferro do mundo, com teores médios de Fe que variam entre 20 % a 35 %; alguns chegam a mais de 64 %, apresentam uma ampla distribuição temporal – como os depósitos do Arqueano, na Groenlândia (Formação

Isua) com idade de 3,8 Ga e os depósitos recentes do Plioceno (1 - 10 Ma) no norte da Eurásia (GOODWIN, 1982) e espacial - como os depósitos de grandes extensões encontrados em quase todos continentes (FIGURA 10).

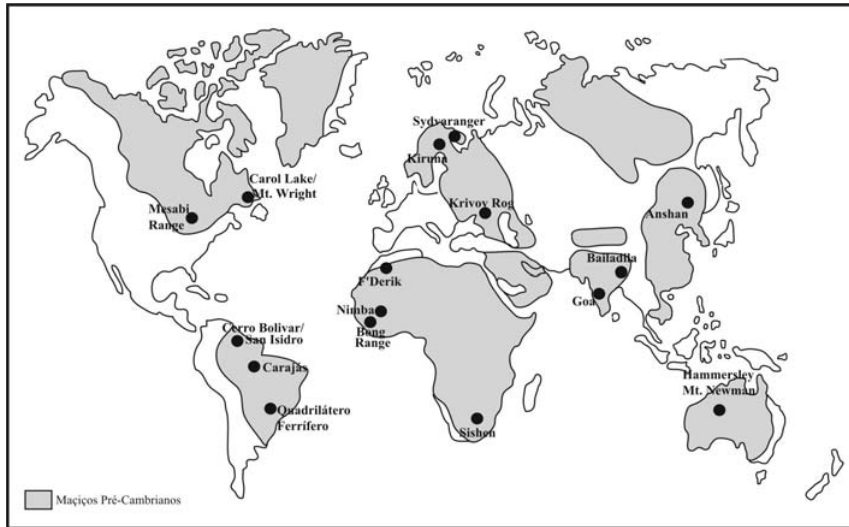


FIGURA 10 – Mapa-mundi com os principais depósitos de minério de Ferro de idade pré-cambrianos (HUNDERTMARK, 1996).

Apesar das formações ferríferas apresentarem uma ampla distribuição temporal, o Pré-Cambriano é o período mais importante de deposição do minério de ferro, visto que esses depósitos representam mais de 97% das formações ferríferas bandadas (TABELA 10). As idades dos grandes depósitos mostram que, houve três períodos principais de deposição: Arqueano (3400 - 3000 Ma), Paleoproterozóico (2700 Ma - 2000 Ma) e Neoproterozóico (1000 Ma - 500 Ma). Dentre eles, os depósitos gerados durante o Paleoproterozóico representam 90 % ou mais dos depósitos de formações ferríferas de todas as épocas (JAMES & TRENDALL, 1982).

	Período (Bilhões de anos)	Bilhões de Toneladas	Total de (BIF's) (%)
I	0.5 – 1.0	12.200	2,0
II	2.0 – 2.7	531.110	92,0
III	3.0 – 3.5	32.001	6,0
IV	Outros	1.015	(0,2)

TABELA 10 – Proporção de BIF's pelo tempo (modificado de GOODWIN 1982).

A origem das formações ferríferas é muito controversa, visto que os modelos genéticos propostos não foram amplamente aceitos, por não apresentarem um modelo geral que explicasse a gênese destes depósitos de minério de ferro. Segundo EICHLER (1976) e CLOUD (1983), esta divergência se deve à dificuldade de aplicação do princípio atualístico nas formações ferríferas do Pré-cambriano pois, provavelmente, as condições ambientais daquela época eram diferentes das atuais. A confecção de um modelo genético deve levar em conta a complexidade de cada depósito, associada aos diferentes processos geológicos atuantes.

Atualmente o único ponto de concordância geral é a sedimentação química dos depósitos BIF's, relacionada a algumas características comuns a vários depósitos, como: a falta de constituintes clásticos em todos depósitos maiores (sem quartzo clástico e minerais pesados); as feições diagenéticas típicas de precipitados coloidais; e a pequena variação na composição química das formações ferríferas (EICHLER, 1976).

A grande quantidade de Fe e Si e a variedade e distribuição errática dos elementos menores das formações ferríferas podem ter sido originadas por processo vulcanogênico e hidrotermal efusivo/exalativo ou pelo processo hidrosedimentar (JAMES, 1954; LEPP & GOLDICH, 1964; EICHLER, 1976). No primeiro processo, a fonte de Fe e Si seria a participação vulcânica, enquanto no segundo, a derivação do Fe e Si e outros constituintes seria a partir de intenso intemperismo da crosta continental ou por lixiviação dos sedimentos do fundo oceânico.

No entanto, o modo de transporte, deposição e as mudanças que ocorreram durante e após a deposição são matéria de discussão (LEPP & GOLDICH, 1964; EICHLER, 1976). A falta de material clástico no local de deposição parece indicar que o aporte de ferro dissolvido e transportado no estado ferroso, em ambiente anóxico (EICHLER, 1976).

O bandamento rítmico típico, presente nos BIF's, pode ter sido gerado tanto por processo inorgânico quanto por processo orgânico. No processo inorgânico, a precipitação da sílica, seria uma consequência das condições físico-químicas próprias, por super concentração ou evaporação com a precipitação sazonal do Fe^{3+} e oxidação catalítica do Fe^{2+} pelo oxigênio, gerado por

microorganismos existentes (no pré-cambriano por cianobactérias). No processo orgânico, o processo catalítico de crescimento sazonal de microorganismos seria o responsável pela precipitação do ferro ferroso dissolvido em ambientes de água rasa; as camadas de sílica seriam resultado de uma precipitação inorgânica contínua em resposta à variação do pH e à mudança da temperatura no ambiente de deposição, formando uma rocha com micro bandamento típico (EICHLER, 1976).

Em algumas formações ferríferas, é possível reconhecer restos de estromatólitos (e microorganismos tipo algas), o que indica que esses organismos primitivos fotossintetisantes podem ter sido importantes durante a deposição das formações ferríferas, agindo como doadores de O₂ para a precipitação do ferro férrico das soluções ferrosas (EICHLER, 1976).

Muitas teorias têm sido sugeridas para explicar a fonte dos constituintes químicos, o modo de transporte e o mecanismo do bandamento, mas nenhuma apresentou um modelo razoável para a origem de todos os BIF's. Em pequena escala, a teoria pode estar correta, mas a controvérsia e os erros começam quando as hipóteses são aplicadas em escala universal. Ou seja, um modelo de origem simples e geral não pode ser aplicado a todos os tipos de depósitos, devido às grandes formações ferríferas bandadas apresentarem: tipos de rochas diversificadas (EICHLER, 1976), idades diferentes que podem implicar diferentes condições deposicionais (JAMES & TRENDALL, 1982) e diferentes ambientes de deposição (GROSS, 1965).

Uma das primeiras classificações foi proposta por JAMES (1954) com base nos minerais de ferro originais dominantes nas formações ferríferas de idade Pré-cambriana na região do Lago Superior, tendo sido separadas em quatro fácies principais: óxido, silicática, carbonática e sulfetada (TABELA 11). A predominância dos minerais dessas classes, em determinadas regiões, dá indícios do ambiente gerador dos depósitos, que podem ser em bacias restritas, separadas do mar aberto, inibindo a livre circulação de águas oceânicas ou não. A presença de diferentes tipos de fácies nos depósitos indica se houve o desenvolvimento de anormalidades no potencial de oxidação e na composição da água, visto que os diferentes precipitados de ferro mostram ser altamente dependente do potencial de oxidação-redução (Eh) e do pH da água.

Outra classificação, proposta por GROSS (1980), separa as formações ferríferas do Pré-Cambriano do Canadá em dois grandes grupos: tipo

Algoma e tipo Lago Superior e em menor escala o tipo Rapitano, baseando-se nos principais ambientes de deposição, como pode ser visto pelo diagrama apresentado por este autor, que mostra os diversos ambientes tectônicos e os tipos de formações ferríferas geradas em cada ambiente de deposição, bem como as várias litofácies presentes (FIGURA 11). Os depósitos do tipo Algoma são formados juntos a arcos vulcânicos e nos *rifts* da cadeia Meso-oceânica, com o Fe de origem vulcânica; enquanto que os depósitos do tipo Superior são formados nas plataformas oceânicas, cuja contribuição de Fe seria originado da lixiviação das rochas existentes; os depósitos do tipo Rapitano são gerados pela lixiviação do Fe causada pelo degelo, formando depósitos nas falhas, tipo: *Graben e/ou Horst*.

	Sulfetada	Carbonática	Silicática		Óxido	
			Não Granular	Granular	Magnetítica	Hematítica
Litologia	Folhelho carbonático pirítico, preto, laminado a finamente laminado. Chert raro.	Chert cinza e carbonato em camadas alternadas, finamente acamadado a laminado.	Silicatos verdes claros a escuros laminados. Chert raro	Maciço verde escuro com acamamento irregular de camadas de chert e magnetita.	Alternância de magnetita e chert, silicato ou silicato + carbonato finamente acamadados ou não.	Alternância de hematita e chert cinza ou jaspe vermelho, finamente acamadado ou não.
Mineral de Ferro	Pirita	Carbonato rico em Ferro.	Silicato de Ferro.	Silicato de Ferro	Magnetita.	Hematita cristalina
Mineral 2° rio	Carbonato.	Pirita, silicato de Ferro e magnetita.	Carbonato e magnetita.	Magnetita, carbonato e hematita.	Silicato de Ferro, carbonato e hematita.	Magnetita.
% de Fe	15-25	20-35	20-30	20-30	25-35	30-40
Feição típica	“Grafitico”	Estiólitos comuns.	Estruturas laminadas.	Granulares	Fortemente magnéticos.	Comumente oolíticos.
Ambiente original	Fortemente redutor e anaeróbico.	Redutor.	Variável, tipicamente meio redutor.	Meio oxidante e meio redutor.	Meio oxidante e meio redutor.	Fortemente oxidante.

TABELA 11 – Principais feições de cada fácies das formações ferríferas (JAMES, 1954).

Atualmente, a classificação proposta por JAMES (1954) é utilizada apenas como termo descritivo das rochas encontradas nos depósitos, sem conotação genética (MORRIS, 1983), pois a distribuição gradacional entre os quatro tipos de fácies mineralógicas em uma mesma bacia sedimentar, na prática, não foi observada em bacia alguma.

A gênese dos depósitos de minérios de ferro continua a ser discutida, mas sem a grande ênfase das décadas anteriores. Atualmente, o estudo do minério de ferro tem sido voltado mais ao conhecimento das características dos diferentes tipos de minérios, colocando a gênese do minério em segundo plano, visto que as teorias existentes satisfazem e não interfere no estudo atual do minério de ferro.

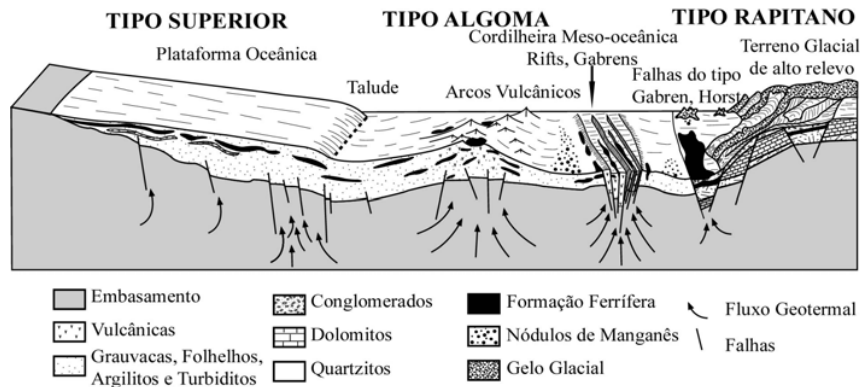


FIGURA 11 – Ambiente tectônico e os tipos de formações ferríferas associadas (GROSS 1993; 1980).

III. 1 – Geologia do Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero (QF) encontra-se inserido numa região de 8.000 km² na porção sudoeste do Cráton São Francisco (ALMEIDA, 1977), compreende uma área entre Belo Horizonte, Santa Bárbara, Congonhas do Campo e Mariana, assim denominado por DORR (1969), devido a forma quadrangular

gerada pela estruturação em domos e bacias das rochas ferríferas do Supergrupo Minas (FIGURA 12).

O QF pode ser dividido geologicamente (FIGURA 13) em: embasamento, formado por rochas granito-gnáissico e *greenstone belts* Rio das Velhas, de idade Arqueana; rochas do Supergrupo Minas, que contêm as Formações Ferríferas Bandadas paleoproterozóicas; e unidades supracrustais do Meso e Neoproterozóico.

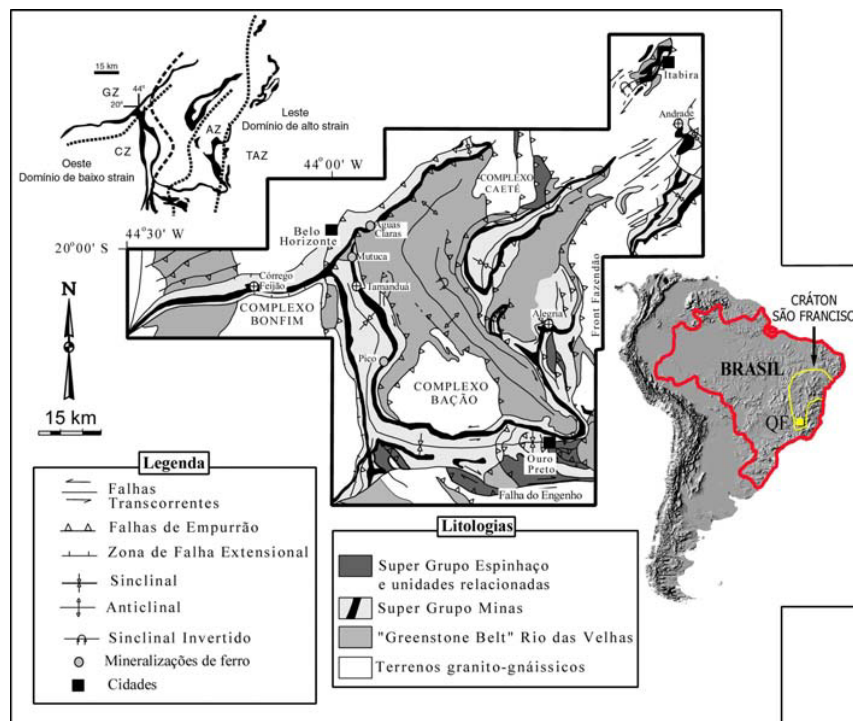


FIGURA 12 – Mapa do Quadrilátero Ferrífero, com as jazidas de minérios de ferro estudadas. O esboço na parte superior à esquerda mostra os detalhes dos domínios de alta e baixa deformação que afetaram as rochas do QF. (GZ; CZ; AZ e TAZ são zonas com diferentes graus metamórficos) (Modificado ROSIÈRE et al., 1993b).

O embasamento do QF é formado por terrenos graníticos gnáissicos e cinturão *greenstone belt* Rio das Velhas. Esses terrenos graníticos gnáissicos são considerados as unidades mais antigas de idade arqueana (SCHORSCHER, 1978; LADEIRA, 1980, entre outros), formados por gnaisse polideformados, de composição tonalítica e granodiorítica, migmatitos, anfibolitos e metraultramafitos,

de idades entre 3200 Ma e 2600 Ma (MACHADO & NOCE, 1993); essas rochas foram metamorfisadas em condições de fácies anfibolito a granulito (HERZ, 1978).

O cinturão *greenstone belt* denominado de Supergrupo Rio das Velhas, divide-se nos Grupos Nova Lima e Maquiné. O Grupo Nova Lima corresponde à unidade vulcânica-sedimentar félsica-máfica-ultramáfica; o Grupo Maquiné, sobreposto a esse conjunto, é constituído principalmente por rochas quartzíticas e metapelíticas (DORR, 1969).

As rochas metassedimentares proterozóicas são denominadas de Supergrupo Minas; seus sedimentos definem o contorno do QF e encontram-se depositadas discordantemente sobre as unidades do Supergrupo Rio das Velhas e dos terrenos graníticos gnáissicos (DORR, 1969; LADEIRA & VIVEIROS, 1984), na sua maior parte tectonicamente (CHEMALE et al., 1994).

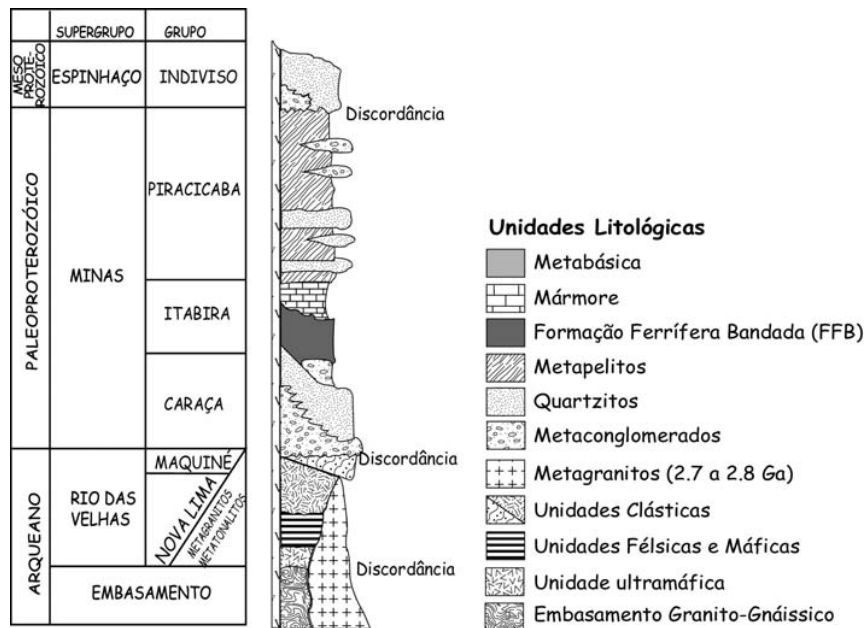


FIGURA 13 – Coluna estratigráfica esquemática (modificado CHEMALE et al., 1991, 1994).

O Supergrupo Minas é dividido em três grupos, da base para o topo: I) Grupo Caraça: essencialmente clástico, é dividido na Formação Moeda, compostos de metaconglomerados e quartzitos; na Formação Batatal, compostos de xistos e filitos; II) Grupo Itabira: constituído predominantemente por rochas de origem química, é dividido na Formação Cauê, composta basicamente de itabiritos

(que são as formações ferríferas bandadas) e Formação Gandarela composta de carbonatos e filitos; e III) Grupo Piracicaba: composto por rochas clásticas e químicas (DORR 1969).

O supergrupo Espinhaço, sobrepõe o Supergrupo Minas e é composto de quartzitos, metaconglomerados e filitos.

III.1.1 – ESTRUTURAÇÃO DO QF

Os trabalhos iniciais, envolvendo a estruturação do QF consideraram uma tectônica polifásica, com desenvolvimento de pelo menos três fases deformacionais, envolvendo várias gerações de dobras e xistosidades, finalizadas por uma tectônica vertical partindo do embasamento; foram executadas sob ponto de vista geométricas, associadas a critérios estratigráficos, sem considerar os aspectos cinemáticos dos eventos deformativos.

Muitos modelos foram propostos para a evolução geológica do QF (DORR, 1969; LADEIRA & VIVEIROS, 1984; MARSHAK & ALKMIN, 1989; CHEMALE et al., 1991; entre outros).

DORR (1969) propôs a existência de três eventos deformativos compressoriais, responsáveis pela formação de sinclinais, tais como: Gandarela, Moeda, Dom Bosco, Santa Rita e Ouro Fino. O primeiro evento seria pré-Minas, afetando apenas as rochas do Supergrupo Rio das Velhas; o segundo seria pós-Minas e pré-Itacolomi; o terceiro e último seria pós-Itacolomi.

LADEIRA & VIVEIROS (1984) propuseram um modelo deformativo polifásico compressional, baseado em seis eventos, sendo que o Supergrupo Rio das Velhas seria afetado apenas pelo primeiro evento; o segundo evento seria o principal a atingir o Supergrupo Minas, com gerações de dobramentos isoclinais recumbentes e cavalgamentos.

MARSHAK & ALKMIN, 1989 propuseram um modelo evolutivo de caráter regional, baseado em quatro eventos deformativos, todos pós-Minas, sendo três compressivos e um extensional. O primeiro evento, compressivo D1, seria responsável pela xistosidade regional de direção NE-SW e mergulho para SE, associada a lineação mineral de caimento para SE, associado ao evento Transamazônico (~2,0 Ga). O segundo compressivo D2, provocado por uma compressão N-S, sob condições supracrustais superficiais, levou à formação de dobras e falhas reversas de direção E-W a WNW-ESSE e a um soerguimento do embasamento, associado ao evento Uruçuano (~1,3 Ga). O terceiro evento, extensional de direção SE, consistiu na formação de falhas normais de direção NE e intrusões de diques máficos. O quarto e último evento, compressivo D3, resultou na formação de um cinturão de dobramento e cavalgamento (*fold-thrust belt*), com vergência para W, afetando o QF, a Cordilheira do Espinhaço e a Bacia do São Francisco, associado ao evento Brasileiro (0,5 Ga).

CHEMALE et al. (1991; 1994) interpretam a estruturação do QF como consequência de dois eventos deformacionais principais, baseando-se na interação das estruturas existentes. O primeiro estaria associado ao soerguimento de blocos granito-gnáissicos, durante uma tectônica extensional, com desenvolvimento de estruturas dômicas e amplos megassinclinais interconectados, sugerindo um movimento geral de WNW para ESE. O segundo evento seria resultado de uma inversão tectônica, com desenvolvimento de um cinturão de dobramento e cavalgamento vergente para W.

A evolução do segundo evento, segundo CHEMALE et al. (1991; 1994), pode ser dividida em três fases: (a) Fase dúctil e penetrativa, com desenvolvimento de cavalgamentos, falhas de rasgamento e conjugadas, lineações de estiramento e mineral, responsável pelo desenvolvimento das principais tramas tectono-metamórficas, em particular dos corpos de minérios de ferro; (b) Fase dúctil-rúptil 1, caracterizada pelos meso e microdobramentos de direção axial E-W e falhas, estruturas essas condicionadas à morfologia e à trajetória dos cavalgamentos; e (c) Fase dúctil-rúptil 2, caracterizada pela reativação das falhas pré-existentes, com dobramentos flexurais de direção axial N-S, em condições dúctil-rúpteis.

Os altos do embasamento gerados durante o primeiro evento funcionaram como obstáculo ao transporte dos cavalgamentos do segundo evento (CHEMALE et al., 1991; 1994). Essa interação produziu zonas de alta e baixa

magnitude de deformação, resultando na complexa geometria que hoje define a estrutura regional (CHEMALE et al., 1991; 1994).

HERZ (1978), HOEFS et al. (1982), entre outros, definiram condições de fácies metamórfico xisto verde para quase toda a seqüência de supracrustais, com aumento até a fácies anfibolito de W para E. A intensidade do tectonismo diminui para oeste de modo a dividir o QF em dois domínios principais: um situado a E do meridiano de 43° 45", com domínio das estruturas associadas ao segundo evento; e outro, a W deste meridiano, onde as estruturas do segundo evento são menos penetrativas.

Apesar das unidades do QF terem sofrido os efeitos de pelo menos dois eventos tectônicos, essas podem ser separadas em zonas de alta (ZAD) e baixa intensidade de deformação (ZBD). As ZBD, ocorrem à oeste do QF, são importantes na descrição de estruturas de origem sedimentar e diagenética, onde a mineralogia original permanece preservada em alguns corpos de minério. Enquanto nas ZAD, que ocorrem à leste do QF, os corpos de minério apresentam estruturações variadas, que refletem nas diferentes texturas encontradas (CHEMALE et al., 1991; ROSIÈRE et al., 1993).

Os dados geocronológicos indicam a ocorrência de três grandes eventos tectônicos: a 2,78 Ga - 2,70 Ga, com retrabalhamento crustal e magmatismo, coincidente com o Ciclo Rio das Velhas (CHEMALE et al., 1991; CARNEIRO et al., 1995); a 2,1 Ga - 2,0 Ga, outro período de retrabalhamento crustal que afetou as rochas do Supergrupo Minas, Ciclo Tranzamazônico (CARNEIRO et al., 1995); a 0,6 Ga – 0,5 Ga, houve a geração de cinturões de cavalgamento e dobramento com vergência de E para W, Ciclo Brasileiro (MARSHAK & ALKMIN, 1989; CHEMALE et al., 1991; CARNEIRO et al., 1995).

III.1.2 – TIPOS DE MINÉRIO DE FERRO DO QF

O minério de ferro explorado no QF pode ser dividido em dois grupos principais: minério itabirítico e minério de alto teor (corpos de hematita) (ROSIÈRE et al., 1993a). Esses minérios são classificados de acordo com a sua mineralogia e textura, que foram geradas durante os eventos de deformação e metamorfismo que afetaram a região. As denominações dos minérios de ferro explorados comercialmente podem ser de vários tipos: hematitas, itabiritos, *blue dust* e canga.

O itabirito é definido pela alternância de bandas, constituídas de óxidos de ferro e minerais transparentes, de espessura milimétrica a centimétrica, com teor primário de ferro variando entre 20 % e 55% de Fe total. O itabirito pode ser friável, pulverulento ou compacto, dependendo da atuação de processos supergênicos. Os itabiritos compactos ou chapinha são minérios de itabirito rico, laminado e ligeiramente alterado por intemperismo (muito utilizado nas usinas siderúrgicas a carvão vegetal).

Em termos composicionais, o itabirito pode ser dividido em três tipos principais, baseados na composição dos minerais transparentes: Itabirito comum - constituído de bandas ricas em SiO₂ e óxido de ferro; Itabirito dolomítico - composto de bandas ricas em carbonatos e óxidos de Fe; Itabirito anfibolítico - compostos de bandas com anfibólios e óxido de Fe; os itabiritos manganíferos e filíticos são tipos subordinados, encontrados ocasionalmente nas interfaces entre os carbonatos estratigraficamente superior, e os filitos inferiores (TABELA 12) (ROSIÈRE et al., 1991).

Os corpos de alto teor são mais homogêneos, constituídos basicamente de hematita e ricos em Fe (> 64 %), encontrados em proporções variáveis na forma de lentes dentro das camadas de itabirito, gerados por enriquecimento supergênico e intempérico. É um minério de peso específico alto, destinado ao uso em aciaria por sua alta pureza. Pode ser encontrado com as seguintes características físicas e texturais: (i) minérios compactos que se apresentam maciços, bandados a laminados, foliados (xistosos), lineados (corpos de orientação linear) e brechados; (ii) minério pulverulento que se apresenta foliado/lineado e granular (grosseiro, médio e fino); e (iii) *blue-dust*, sem estrutura interna.

A posição desses diferentes tipos de minérios está fortemente condicionada pela estruturação tectônica, intensidade de deformação e grau de intemperismo (CHEMALE et al., 1987; ZAVAGLIA, 1995). Nas ZBD predominam os corpos compactos maciços poucos recristalizados, enquanto que nas ZAD há o

predomínio dos corpos foliados ou lineados bastante recristalizados com a textura condicionada pelo tipo de deformação sofrida. Os corpos pulverulentos ricos ocorrem nas duas zonas, em decorrência da intensa lixiviação por fluidos hidrotermais ou por processos intempéricos.

Tipos de Minérios	Componentes Principais		Acessórios **
Itabirito comum	Bandas claras	Quartzo	Hematita, clorita, sericita, dolomita, pirofilita, óxido de Mn.
	Bandas escuras	Óxido de Ferro *	Sericita, quartzo, pirofilita.
Itabirito Dolomítico	Bandas claras	Dolomita	Quartzo, Óxido de Ferro*, pirofilita, talco, óxido de Mn.
	Bandas escuras	Óxido de Ferro *	Quartzo, dolomita, Óxido de Ferro*.
Itabirito Anfibolítico	Bandas claras	Tremolita/Actinolita/horn blenda, grunerita.	Quartzo, dolomita, Óxido de Ferro.
	Bandas escuras	Óxido de Ferro *	Quartzo, dolomita, Anfibólio.
Alto teor	Hematita		Magnetita, quartzo, pirofilita.
* Hematita é o mineral-minério dominante, Magnetita aparece subordinadamente.			
** Fostafos de ferro de todos os tipos podem ocorrer. Sulfetos presentes, ocasionalmente.			

TABELA 12 – Composição mineralógica dos diferentes tipos de minério do QF (ROSIÈRE et al., 1991).

Além dos tipos descritos acima, encontram-se outros tipos de minério, produto dos processos intempéricos. Apesar de serem explorados comercialmente em alguns locais, apresentam ocorrência restrita e de menor valor econômico, que são:

Canga – é um minério secundário, constituído de brecha de hematita cimentada por limonita, originado por processo de lixiviação e intemperismo sofrido pelos corpos de minério. Apesar de seu teor de Fe mais baixo e teor de fósforo elevado, tem sido utilizado pelas usinas a carvão vegetal devido a sua porosidade, que torna sua redução mais fácil.

Minério de Rolamento – é o minério fragmentário, acumulado nos taludes das montanhas ferríferas, composto por cascalho de itabirito eluvial, enriquecidos em Fe pela perda parcial de Si e parcialmente hidratados. Este minério é também de importância local.

III.2 – Geologia da Serra dos Carajás

A principal província mineral brasileira é a Serra dos Carajás (SCJ) cujo depósito de minério de ferro é um dos maiores da América do Sul. A região de Carajás situa-se próximo à borda SE do Cráton Amazônico e forma uma entidade tectônica de idade pré-brasileira (ALMEIDA et al., 1976). O principal conjunto de depósitos da SCJ situa-se entre as serras Norte, Sul e Leste entre os municípios de Marabá e São Félix do Sul, no sul do Estado do Pará, na Bacia dos Rios Itacaúnas e Paraupébas (FIGURA 14) (COELHO, 1986).

No Cráton Amazônico, o embasamento é pouco conhecido. Apesar disso não há grandes divergências entre os autores. Neste embasamento, predominam metamorfitos de alto grau e intrusivas associadas, atribuídas como arqueanas e remobilizadas por eventos posteriores, como o Ciclo Transamazônico (MACAMBIRA et al., 1990).

O embasamento na região da Serra Norte está representado pelo Complexo Xingu, que é composto principalmente por gnaisses graníticos, granodioríticos e tonalíticos, bem como de anfibolitos e intrusões tonalíticas subordinadas (MACAMBIRA et al., op cit.).

As rochas supracrustais foram depositadas em inconformidade sobre o Complexo Xingu e são denominadas de Supergrupo Itacaúnas, formada pelos Grupos: Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão-Pará, Igarapé Bahia e Buritirama (DOCEGEO, 1988). A principal característica do Supergrupo Itacaúnas é a apresentação de uma evolução vulcano-sedimentar de idade arqueana, sendo litologicamente distinta dos *greenstones belts* da região mais ao sul de Carajás.

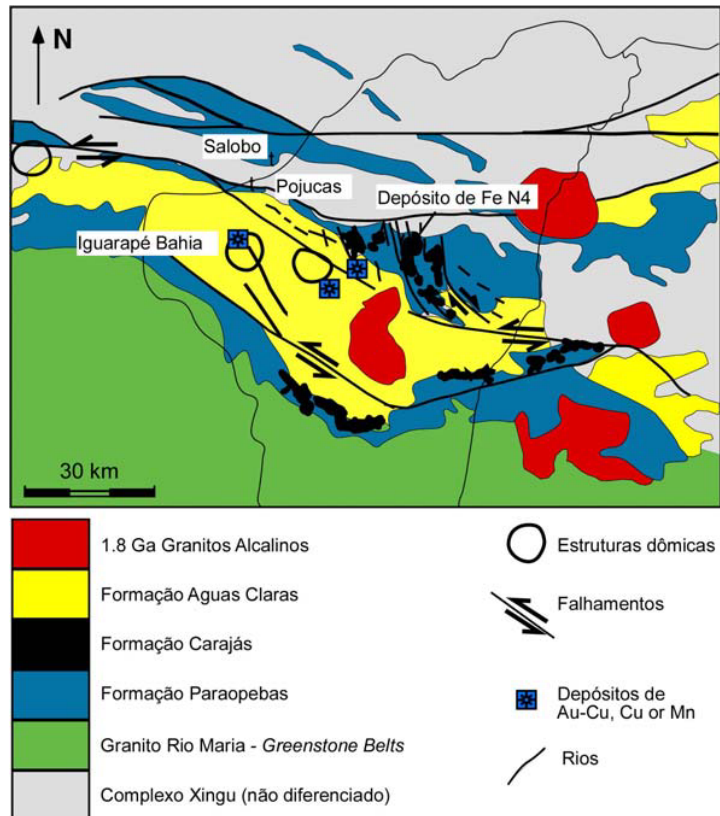


FIGURA 14 – Mapa geológico simplificado da região da Serra dos Carajás. (Modificado de DOCEGEO, 1988, por CHEMALE et al., 1998).

A coluna cronoestratigráfica apresentada abaixo, foi proposta por MACAMBIRA et al. (1990) para a região da Serra Norte e Pojuca (FIGURA 15). O Grupo Grão Pará está acima do Grupo Igarapé Pojuca, baseando-se em algumas considerações: a idade do metamorfismo do Grupo Igarapé Pojuca é de 2900 Ma (método Rb/Sr) e o Grupo Grão Pará apresentou a idade de cristalização de 2700 Ma (método U/Pb). Além disso, esses dois grupos apresentam diferentes graus de metamorfismo, intensidades e direções de deformações, bem como de metalogênias associadas. O Grupo Igarapé Pojuca é mineralizado em ouro e sulfetos de cobre, zinco e molibdênio, enquanto que o Grupo Grão Pará em depósitos de minérios de ferro e manganês.

As rochas vulcânicas da Formação Paraopebas ocorrem numa seqüência bimodal de basaltos, doleritos e riolitos. As datações radiométricas pelo método U-Pb em zircão, indicaram uma idade de 2758 ± 78 Ma das rochas vulcânicas félsicas (WIRTH et al., 1986) e de 2759 ± 2 Ma nos riolitos (MACHADO et al, 1991); enquanto as idades em Rb/Sr, de rocha total, dos basaltos da mesma

formação indicara 2687 ± 54 Ma (GIBBS et al., 1986). Os valores obtidos permitem atribuir idade arqueana para o vulcanismo do Grupo Grão Pará.

Eonotema	Eratema	Unidade	Descrição
Fanero-zóico	Cenozóico	Coberturas Lateríticas	Lateritas aluminosas e/ou ferruginosas
	Paleozóico	Corpos Máficos Intrusivos	Diques e soleiras de diabásio
Proterozóico	Inferior	Granito Serra dos Carajás	Granitos com anfibólios e/ou biotitas
		Gabro Santa Inês	Gabro grosseiro hidrotermalizado
		Formação Igarapé Azul	Arenitos com níveis conglomeráticos e siltitos intercalados
Arqueozóico	Grupo Grão Pará	Formação Igarapé Boa sorte	Siltitos e folhelhos carbonáticos com arenitos subordinados
		Formação Igarapé Cigarra	Basaltos, diabásios, tufo, BIF, chert, quartzo wacke e quartzo arenito
		Formação Carajás	BIF com soleiras de diabásio
	Grupo Igarapé Pojuca	Formação Paraopebas	Basaltos e riolitos com raras intercalações de BIF
		Formação Gameleira	Meta-arenitos e meta-siltitos.
		Formação Corpo 4	Metavulcânicas máfica a intermediárias com metassedimentos clasto-químicos intercalados
		Formação Bueno	BIF e anfibolitos variados
	Complexo Xingu		Gnaisses granodioríticos a tonalíticos, anfibolitos e trondhjemitos

FIGURA 15 – Coluna Cronoestratigráfica das áreas dos Projetos Serra Norte e Pojuca (Modificado MACAMBIRA et al., op. cit.).

A Formação Igarapé Azul é formada por arenitos fluviais e estão recobrendo as unidades inferiores. Todas unidades foram cortadas por intrusões de corpos graníticos semicirculares a circulares de dimensões variáveis (25 a 65 km de diâmetro) (HIRATA et al., 1982); durante o Paleoproterozóico e Mesoproterozóico.

Os corpos graníticos recebem denominações locais, MACHADO et al. (1991) dataram os Granitos Pojuca e Cigano, através do método U/Pb, apresentando idades de 1880 ± 2 Ma, $1883 \pm 5/-3$ Ma e 1883 ± 3 Ma, respectivamente. As idades desses granitos, indicadas pelos dados radiométricos, mostram que tanto

o embasamento quanto a cobertura foram cortadas por esses plútons graníticos e diques básicos (WIRTH et al., 1986 e PINHEIRO & HOLDSWORTH, 1997a).

III.2.1 – ESTRUTURAÇÃO DA SERRA DOS CARAJÁS

A Bacia de Carajás possui cerca de 1000 km de comprimento por 100 km de largura, situado a Leste do Cráton Amazônico, tem como estrutura dominante o lineamento do Sinclinório Carajás. A estrutura geral da área da Serra dos Carajás é interpretada como sendo um sinclinório falhado, com eixo de direção WNW-ESE e caimento para WNW e com os flancos aparecendo em relevo nas Serras Norte e Sul e constituídos pelas rochas do Grupo Grão Pará (BEISIEGEL et al., 1973).

As unidades presentes na região de Carajás apresentam-se na forma de faixas e lentes subparalelas, moldando-se num padrão anastomosado de zona de cisalhamento de orientação preferencial E-W, denominado de Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas. ARAÚJO et al. (1988) interpretaram a região da Serra dos Carajás como sendo uma “Flor Positiva”, definida por um sigmóide alongado na direção WNW-ESE e compostas por rochas do Complexo Xingu, do Gnaiss Estrela e do Grupo Grão Pará. A geometria em “Flor Positiva” está associada a um sistema transcorrente sinistral, formado por um feixe do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, de caráter dúctil-rúptil.

Essa região, do ponto de vista estrutural, é cortada por sistemas de lineamentos de direção E-W (como estrutura Salobo e Núcleo) e lineamentos de direção N70W-S70E (como Falha de Carajás). Segundo PINHEIRO & HOLDSWORTH (1997) a geometria dessas falhas parece estar fortemente controlada pelas rochas do embasamento, conforme pode ser observado pela orientação das fábricas.

O Sistema de Falha Carajás possui aproximadamente 350 km de extensão e direção geral WNW-ESE, esta falha tem terminações tipo “rabo-de-cavalo”, representadas pela Serra do Rabo e pelo Sistema Cinzento (foz do rio Cinzento). A Falha Carajás é a mais importante, pois afeta fortemente as rochas mineralizadas e divide o Sinclinório Carajás em dois domínios:

- (a) Domínio Norte com os corpos de depósito de Ferro dobrado, segmentado e rotacionado (N1 a N9). Com várias falhas lítricas de direção norte sul controlando as posições desses corpos;
- (b) Domínio Sul incluindo os mergulhos norte dos depósitos (S1 a S45) que formam um limbo sul, relativamente contínuo do sinclinório, sem rotação ou fragmentação aparente do bloco secundário.

No Platô N-4 (local) da mina de minério de ferro, as unidades da Formação Paraupebas encontram-se tectonicamente justapostas acima e abaixo da Formação Carajás (BEISIEGEL et al., 1973). As formações ferríferas de Carajás formam altos topográficos tanto ao norte quanto ao sul da região.

III.2.2 – TIPOS DE MINÉRIOS DA SERRA DOS CARAJÁS

A Formação Carajás é compreendida de espessas camadas de jaspilitos e seus produtos de alteração e intemperismo, cortada por lentes de hematita dura e chaminés (*sills*) e diques de rochas básicas. Os jaspilitos são de granulação fina e composição mineralógica simples: quartzo, hematita e martita, com magnetita subordinada e apresentam microbandamento de espessura milimétrica a submilimétrica uniforme e um mesobandamento irregular com bandas escuras que engrossam e afinam continuamente, alternadas com bandas róseas, centimétricas (BEISIEGEL, 1973).

As formações ferríferas da Formação Carajás são compostas de diferentes tipologias de minério de ferro, todos pertencentes a fácies óxidos (BEISIEGEL, 1982), cuja nomenclatura está associada ao uso industrial e propriedades físicas do minério.

Os tipos principais de minérios são: (a) hematita: minérios ricos em óxidos ou hidróxidos de ferro; (b) itabiritos: protominérios; (c) canga: material superficial (que apresenta teor significativo de ferro e fósforo). Na divisão em tipos considera-se também a classificação granulométrica, em função do percentual retido e passante na fração 3/8" e 60 *mesh*, dividindo em Dura (retido na malha de 3/8"), Mole (entre malha de 3/8" e 60 *mesh*) e Pulverulenta (abaixo de 60 *mesh*) (essa classificação é possível, visto que há apenas uma mineração a explorar o minério da Serra dos Carajás). Assim o minério recebe a denominação de Hematita Dura, Hematita Mole e Hematita Pulverulenta. A mesma classificação é utilizada para os itabiritos.

A Hematita Dura é caracterizada pela variedade compacta de cor cinza-azulado, constituída essencialmente de especularita (hematita lamelar), formando um agregado cristalino, com acentuada xistosidade, pode ter bandamento.

A Hematita Semidura é o minério bandado, constituído por palhetas de especularita e cristais de martita com inclusões de magnetita, alternadas com leitões constituídos de goethita fibrosa e limonita terrosa, formando bandas alternadas cinza-azuladas com bandas acastanhadas; esse minério tende a partir-se em placas, também retido na malha de 3/8" *mesh*.

A Hematita Mole é de coloração cinzenta a negra e estrutura finamente bandada, constituída de hematita em palhetas de 10 µm a 100 µm de espessuras, alternadas com bandas foscas e porosas, compostas por cristais octaédricos de martita (com 100 µm de diâmetro médio), com massas irregulares de magnetita residual; goethita com inclusão de martita e como cimento de palhetas de hematita; devido à diferença de coesão entre as bandas, o minério quebra-se facilmente em pequenas placas durante o manuseio, produzindo um pó fino.

A Hematita Pulverulenta é constituída de material cinzento-escuro a negro, podendo apresentar ou não estrutura bandada, sendo composta quase que exclusivamente de óxidos de ferro; apresenta distribuição espacial igual à da hematita mole; geralmente há uma transição gradual entre esses dois tipos.

III.3 – Geologia das Minas de Minério de Ferro Estudadas

Aqui será apresentada, por ordem alfabética, uma breve descrição da geologia local de cada mina amostrada.

Na FIGURA 16 encontra-se o mapa do Quadrilátero Ferrífero com a localização das minas que tiveram amostras coletadas. A seguir encontra-se uma descrição mais detalhada das minas, cujos minérios foram escolhidos para a realização do presente estudo.

III.3.1 – MINA DE ALEGRIA

A história da região de Alegria iniciou no começo do século XVIII, com a exploração de ouro. A pesquisa geológica do minério de ferro de Alegria iniciou-se com a empresa *The Brazilian Iron and Steel Company* em 1911. A partir de 1943, a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira (CSBM) adquiriu as propriedades mais pelas matas, para obtenção do carvão vegetal para sua usina siderúrgica, do que pela jazida de ferro de Alegria.

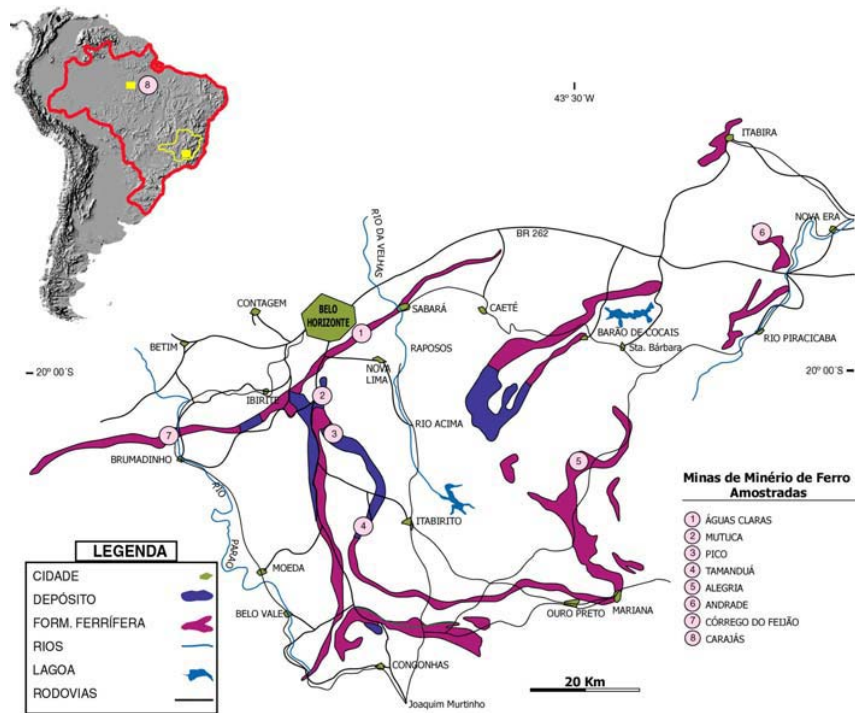


FIGURA 16 – Mapa do Quadrilátero Ferrífero e da América do Sul, com a localização das minas onde foram coletados os minérios para o presente estudo.

Em 1961 a CSBM transferiu os direitos sobre as áreas mineralizadas a sua subsidiária S.A. Mineração Trindade (SAMITRI), que efetivamente passou a pesquisar o minério de ferro e ferro-manganês, passando a ser denominado de Complexo Alegria, que englobavam várias minas e jazidas (BARCELOS & BÜCHI, 1986). Em 2000 a SAMITRI foi adquirida pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) que passou a ter 99,18 % do capital total da empresa (BDMG, 2002).

A jazida de ferro de Alegria situa-se próximo da charneira da estrutura sinformal de Alegria, ao norte da cidade de Mariana (MG), leste do Quadrilátero Ferrífero (FIGURA 16). A geologia local é representada pelo domínio dos itabiritos da Formação Cauê, cobertos pela ganga, denominada de “Chapéu de Ferro”, é encontrado o filito da Formação Batatal e o quartzito da Formação Moeda ao norte da mina ou intercalados nos falhamentos que cortam os itabiritos (FIGURA 17) (BARCELOS & BÜCHI, 1986).

A estruturação e a compartimentação da jazida apresenta um padrão lenticular, recorrente e imbricado das rochas e minérios de ferro, refletindo o evento

regional compressivo. A geometria da estrutura da jazida está associada à tectônica de cavalgamento que afetou a porção leste do Quadrilátero Ferrífero. VERÍSSIMO (1999), através de modelamento tridimensional da jazida de Alegria observou que o padrão geométrico, exibido pelos corpos de minério na superfície, confirma a tectônica de cavalgamento, que atuou na borda leste do Quadrilátero Ferrífero (MARSHAK & ALKMIN, 1989; CHEMALE et al., 1991).

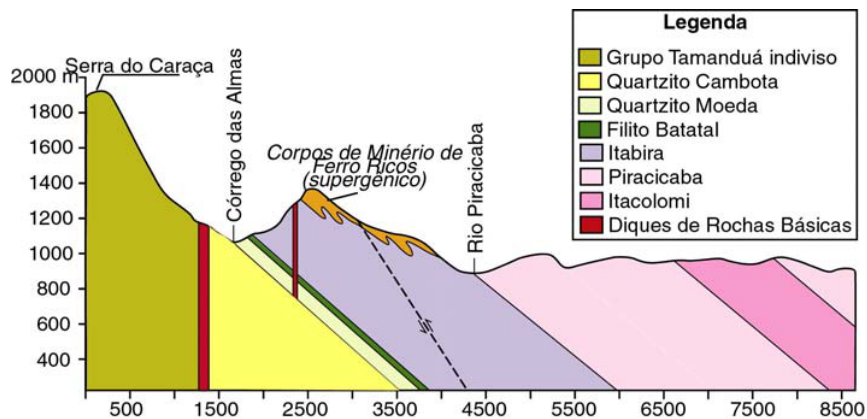


FIGURA 17 – Perfil Geológico típico da Mina de Alegria (Modificado BARCELOS & BÜCHI, 1986).

De uma forma geral, os minérios de Alegria são diferenciados em hematitas e itabiritos: as primeiras com teores de ferro superiores a 63,5 %; os últimos, variando entre 30 % e 63,5 %. Os itabiritos classificam-se em martíticos, goethíticos, especularíticos, magnetíticos e anfibolíticos, em função de sua mineralogia. As hematitas podem ser martíticas, magnéticas, especularíticas e, mais raramente, anfibolíticas. Outro critério de classificação baseia-se nas propriedades físicas, diferenciando itabiritos e hematitas em compactos (as), friáveis e pulverulentos (as) (VERÍSSIMO, 1999).

Os itabiritos de Alegria, em sua maior parte, provêm de formações ferríferas da fácies óxido, à exceção dos goethíticos e anfibolíticos que, aparentemente, correspondem à fácies silicato ou óxido-silicato, com impurezas carbonáticas (VERÍSSIMO, 1999). A evolução mineralógico/textural dos minérios está associado às condições de T e P da fácies anfibolito, posteriormente modificada pelos processos de intemperismo superficial, denominado laterização, permitindo a lixiviação da sílica e enriquecimento do material remanescente em Fe e Al; associado a esse processo pode ocorrer a solubilização do ferro ou hidratação

da hematita, formando limonita e goethita, respectivamente, (BARCELOS & BÜCHI, 1986).

Além dos processos de laterização e hidratação, as diferenciações nas tipologias dos minérios dessa mina, devem-se também à seqüência litológica associada, como por exemplo: itabiritos, quando confinados entre rochas impermeáveis (filitos e metabasitos), sofrem processos diferenciados de enriquecimento supergênico, permitindo a geração de leitos expressivos de goethita (BARCELOS & BÜCHI, 1986). Esses processos de transformação permitem a formação de vários tipos de minérios, quando classificados quanto ao teor de Fe, SiO₂, Al₂O₃, P e água de hidratação (Perda por Calcinação/PPC) (BARCELOS & BÜCHI, 1986).

A lavra é executada pelo método a céu aberto, com desenvolvimento vertical, em bancadas de 8 m de altura e largura mínima de 10m; a inclinação dos taludes é de 60° no minério e 45° no estéril. O minério é transportado por caminhões de pequeno porte e levados para praça de alimentação das instalações de tratamento.

O processo de tratamento mecânico é constituído da blendagem de vários tipos de minério bruto, extraído na mina em pilhas-pulmão, na praça de alimentação; segue-se da britagem primária, peneiramento ao natural e britagem em circuito fechado, com repeneiramento com água. São duas instalações de tratamento do minério ao natural e uma com repeneiramento com água. Dessas instalações saem dois tipos de produtos: o fino de < 10 mm (fino/AL) e o granulado de 10 X 30 mm, na proporção de 80 % e 20 %, respectivamente.

III.3.2 – MINA DE ANDRADE

A mina de Andrade iniciou suas atividades mineradoras no começo dos anos 20, quando Gaston Barbanson adquiriu a Forja Catalã, construída em 1845, por Jean Monlevade, em São Miguel de Piracicaba. Apesar do minério de ferro estar aflorando, a falta de infra-estrutura para escoamento da produção de gusa e depois de aço, prejudicou o desenvolvimento dessa região, mas marcou o início da mineração do minério de ferro (<http://www.asminasgerais.com.br/qf/TeCer/Industria/csbm/> - Cid Wildhafen).

A exploração do minério era feita pela SAMITRI, subsidiária do Grupo Belgo-Mineira, até 2000, quando este decidiu vender a SAMITRI para a CVRD, mas manteve em seus ativos da Mina de Andrade, porque esta mina tem ligação direta com a usina siderúrgica da Belgo-Mineira, que é a principal unidade do grupo CSBM e fica no município de João Monlevade (www.uol.com.br/diariodovale/arquivo/2000/maio/31/page/fr-economia.htm).

A Mina de Andrade está localizada a 8 km a NW da cidade de João Monlevade (MG), dentro da estrutura denominada de Sinclinal do Andrade, na porção NE do QF (FIGURA 16).

O Sinclinal do Andrade é uma das grandes estruturas da região: apresenta eixo orientado NE-SW, dado pelo acamamento e xistosidade, cujas direções variam entre E-W e NW-SE (FIGURA 18) (JANUZZI et al., 1995).

A geologia local mostra que a mina encontra-se posicionada dentro da Formação Cauê, constituída de minérios de alto teor e itabiritos, além de intercalações de xistos e anfíbolitos (FIGURA 18). Os anfíbólios-xistos, clorita-talco-xistos e xistos caulíníticos, encontrados na base, estão altamente intemperizados.

Os registros, da primeira fase de deformação dúctil que afetou o QF (CHEMALE et al., 1991), são encontrados na geração da foliação (S1), com orientação de cristais de hematita lamelar; o desenvolvimento de escamas de cavalgamentos, com vergência para W/SW. Esses cavalgamentos permitiram o espessamento das formações ferríferas e, além de colocá-las em contato com os xistos, filitos, gnaisses e quartzitos, permitiram o aparecimento de xistos e anfíbólios-xistos intercalados ao pacote da formação ferrífera (JANUZZI et al., 1995; JANUZZI, 1999). O segundo evento é marcado pelo desenvolvimento de uma zona transpressiva de direção NE/SW, que localmente individualizaram os corpos de hematita (JANUZZI et al., 1995; JANUZZI, 1999).

O contexto estrutural à qual foram submetidas as rochas da Mina do Andrade, colocando a formação ferrífera (rocha permeável) entre xistos (rocha impermeável), permitiu uma maior lixiviação da sílica e carbonatos na calha do Sinclinal Andrade do que nas bordas (JANUZZI, 1999).

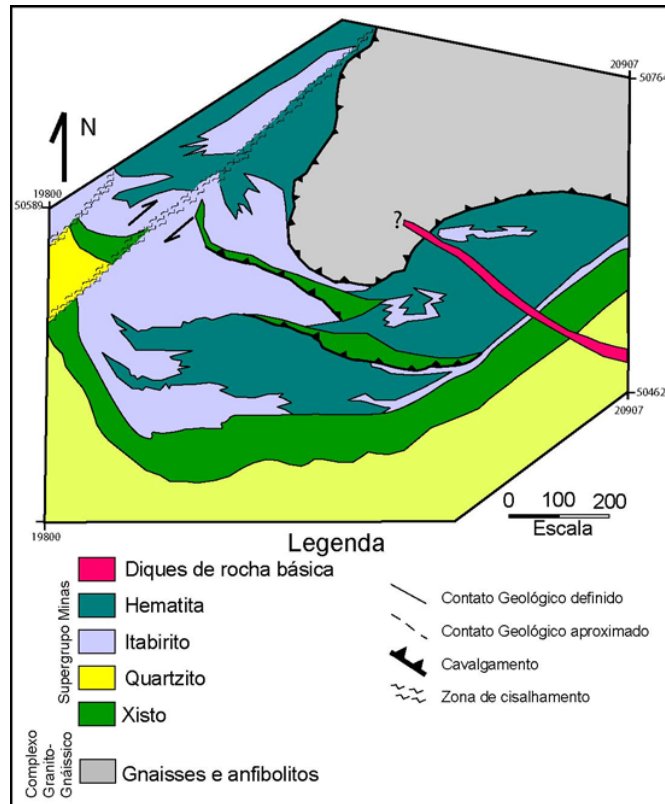


FIGURA 18 – Mapa Geológico da Mina do Andrade (JANUZZI, 1999).

O minério da Mina do Andrade é rico e mineralogicamente homogêneo, sendo constituído basicamente de hematita, com martita, magnetita e quartzo ocorrendo de forma subordinada (RAMOS et al., 1995). No entanto, pode-se dividir em diversos tipos de minério de ferro, devido às variações geradas pelas deformações sofridas pela formação ferrífera, associados ao grau metamórfico elevado (fácies anfibolito com retrometamorfismo para xisto-verde) (JANUZZI, 1999).

Os tipos de minérios encontrados na Mina do Andrade são: hematita xistosa compacta, hematita xistosa semcompacta, hematita xistosa friável e hematita pulverulenta, além de itabiritos comuns, constituídos de quartzo e óxidos de ferro (hematita e magnetita martitizada), geralmente bastante alterados, com

itabiritos dolomíticos encontrados em profundidade (furos de sondagens) e algum itabirito anfíbolítico (JANUZZI et al., 1995).

O método de lavra utilizado é o de céu aberto, com bancadas verticais.

III.3.3 – MINA DO CÓRREGO DO FEIJÃO

O Complexo de Feijão está situado no limite noroeste do Quadrilátero Ferrífero, 40 km a oeste de Belo Horizonte; encontra-se sob a aba do Anticlinal da Serra do Curral (FIGURA 16).

A geologia local é composta basicamente por rochas do Grupo Itabira, sendo que o minério é encontrado na Formação Cauê, que se encontra entre o filito da Formação Batatal na base e pelos quartzitos ferruginosos da Formação Cercadinho.

Os itabiritos foram enriquecidos por processos supergênicos e intempéricos, sendo transformados em corpos de hematita. Na região as intensidades dos processos deformacionais foram mais incipientes que nas demais regiões do QF, visto pela preservação da mineralogia original com pouca transformação, ou seja, encontra-se ainda minerais primários. O Minério de ferro das jazidas do Complexo de Feijão alinha-se entre as mais ricas do mundo.

O método de lavra utilizado é a céu aberto (FIGURA 19), com desenvolvimento vertical, em bancadas de 10 metros de altura; o minério é extraído com: pá carregadeira e escavadeira hidráulica; que carregam os caminhões e o transporta para a unidade de britagem, localizada a 1 km de distância (<http://www.ferteco.com.br/feijao.htm>). A relação estéril/minério é de 0,5 t/1,0 t.

O tratamento do minério consiste na britagem do minério ROM a menos de 30 mm, em britadores de mandíbula e giratórios; seguido de lavagem, peneiramento e deslamagem, obtendo-se assim, produtos de alta qualidade.



FIGURA 19 – Visão geral da Mina Córrego do Feijão (imagem retirada do site: <http://www.ferteco.com.br/feijao.htm>).

III.3.4. – MINA DO TAMANDUÁ

A mina do Tamanduá encontra-se localizada no município de Nova Lima, junto com a mina Capitão do Mato e a planta de beneficiamento de Vargem Grande, formando o Complexo Tamanduá (FIGURA 20). É o mais recente empreendimento da MBR (http://www.mbr.com.br/conheca/complexo_tamandua.asp).

O depósito de minério de ferro da mina de Tamanduá encontra-se na aba leste da Serra da Moeda; possui a forma de uma cunha com perda de potência em profundidade; corresponde a um pacote de formação ferrífera bandada silicosa ou carbonática, intensamente lixiviada (ZAVAGLIA, 1995).



FIGURA 20 – Vista geral do Complexo Tamanduá (imagem retirado do site: http://www.mbr.com.br/conheca/complexo_tamandua.asp).

A dimensão do corpo de hematita é de 1300 m de comprimento, 600 m de largura máxima e profundidade média de 500 m. Todo o pacote de rochas metassedimentares encaixantes e corpo de minério comportam-se como uma estrutura monoclinal com suas camadas invertidas e intensamente dobradas, correspondendo justamente a aba leste do Sinclinal Moeda (FIGURA 21) (GOMES, 1986; ZAVAGLIA, 1995).

O método de lavra é a céu aberto, com desenvolvimento vertical. O minério extraído é transportado à nova planta de beneficiamento Vargem Grande, com capacidade instalada de 15 milhões de toneladas por ano; encontra-se localizada estrategicamente próxima ao Terminal Ferroviário de Andaime, o que permite o escoamento da produção, via Ferrovia do Aço, até o Terminal Marítimo da Ilha Guaíba, (http://www.mbr.com.br/conheca/complexo_tamandua.asp).

A otimização do uso da Ferrovia do Aço, da MRS Logística é garantida por um sistema de correias transportadoras, que interliga as minas de Tamanduá e Capitão do Mato à planta de beneficiamento de Vargem Grande e,

depois de processado, o minério de ferro segue até o Terminal Ferroviário de Andaime, também por correias; dali parte para o Terminal da Ilha Guaíba para ser exportado (http://www.mbr.com.br/conheca/complexo_tamandua.asp).

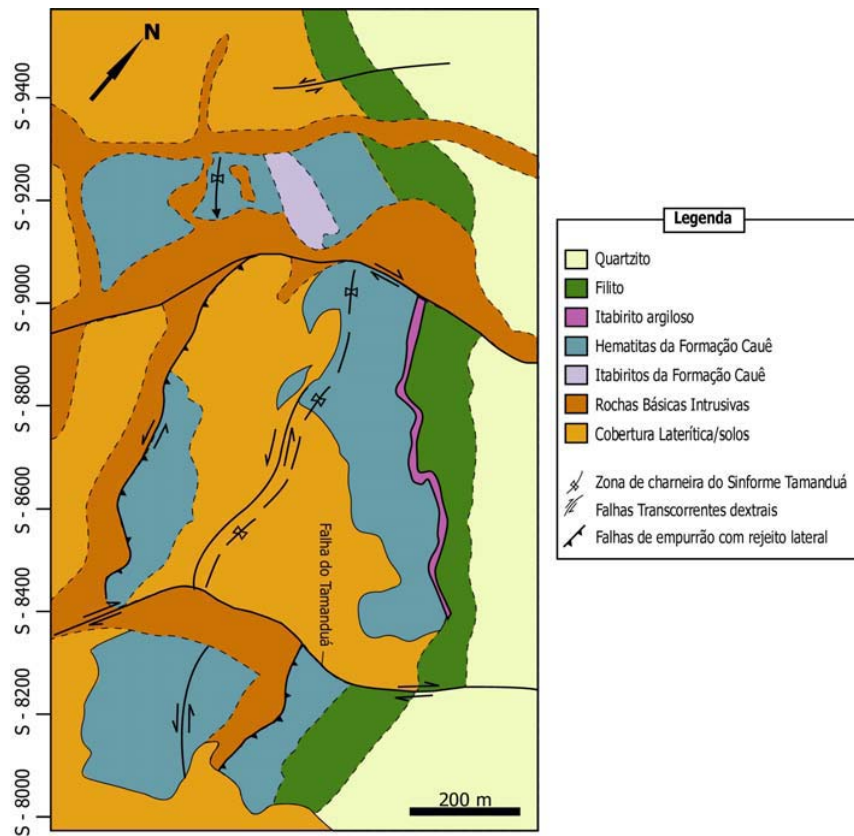


FIGURA 21 – Mapa geológico da mina do Tamandú (ZAVAGLIA, 1995).

III.3.5 – MINA DA SERRA DOS CARAJÁS – N4

O primeiro reconhecimento geológico da região de Carajás surgiu na década de 1920 e a primeira avaliação real do potencial de minério ocorreu por volta de 1965, em 1966, iniciou-se efetivamente a pesquisa geológica local, com o descobrimento do depósito de manganês do Sereno, em Marabá (PA), pela Companhia de Desenvolvimento de Indústrias Mineráveis (Codim) (<http://www.cvrd.com.br/src/frameset.html?LIN=/port&CAP=/geral&SEC=/sitemap>).

A jazida de ferro em Carajás foi descoberta em 1967 pela Cia. Meridional de Mineração S.A. (CMM), a subsidiária brasileira da *U. S. Steel*. A pesquisa geológica do minério de ferro foi feita pelo projeto denominado Ferro-Carajás, com o final do trabalho de detalhamento do corpo de minério em 1974 (<http://www.cvrd.com.br/src/frameset.html?LIN=/port&CAP=/geral&SEC=/sitemap>). O Projeto Ferro Carajás consistia num sistema integrado, compreendendo mina, ferrovia e porto.

A Província Mineral de Carajás (FIGURA 14) é notável, pois além de uma reserva de ferro natural de alta qualidade (66% Fe), tem outras jazidas que se encontram em produção de interesse comercial (manganês e ouro), corpos de minério de cobre e níquel (respectivamente Salobo e Vermelho) que estão em desenvolvimento e ocorrências da bauxita, estanho, cromo e wolframita que estão sob investigação; assim desde a sua descoberta, vem sendo aos poucos transformada na maior província mineral do Brasil (<http://www.cvrd.com.br/src/frameset.html?LIN=/port&CAP=/geral&SEC=/sitemap>).

As reservas de minério encontram-se distribuídas em 60 depósitos diferentes sendo dois grupos principais: os depósitos da Serra Norte e Serra Sul e, de menor expressão, os depósitos das Serra Leste e Serra São Félix do Xingu.

O primeiro depósito a ser explorado foi o da Serra Norte; foi escolhida a jazida N4, que é dividida em Braço Oeste e Braço Leste (FIGURA 22), o primeiro é constituído por três áreas de afloramentos de hematita, separadas por canga de minério (áreas setentrional, central e meridional); o segundo é formado por uma faixa de minério *in situ* contínua aflorante; nesses braços, a espessura máxima da capa de canga é de 19 m (Oeste) e 25 m (Leste), com profundidade máxima a partir da superfície de 275 m e 285 m, respectivamente (COELHO, 1986).

O primeiro corpo de minério de ferro a ser explorado em Carajás foi o N4E (em 1981), devido ao seu melhor posicionamento geográfico em relação ao escoamento do minério ao Porto de São Luís, além de apresentar maior

concentração de minério de boa qualidade por unidade de área (BEISEIGEL, 1982; <http://www.cvrd.com.br/src/frameset.html?LIN=/port&CAP=/geral&SEC=/sitemap>).

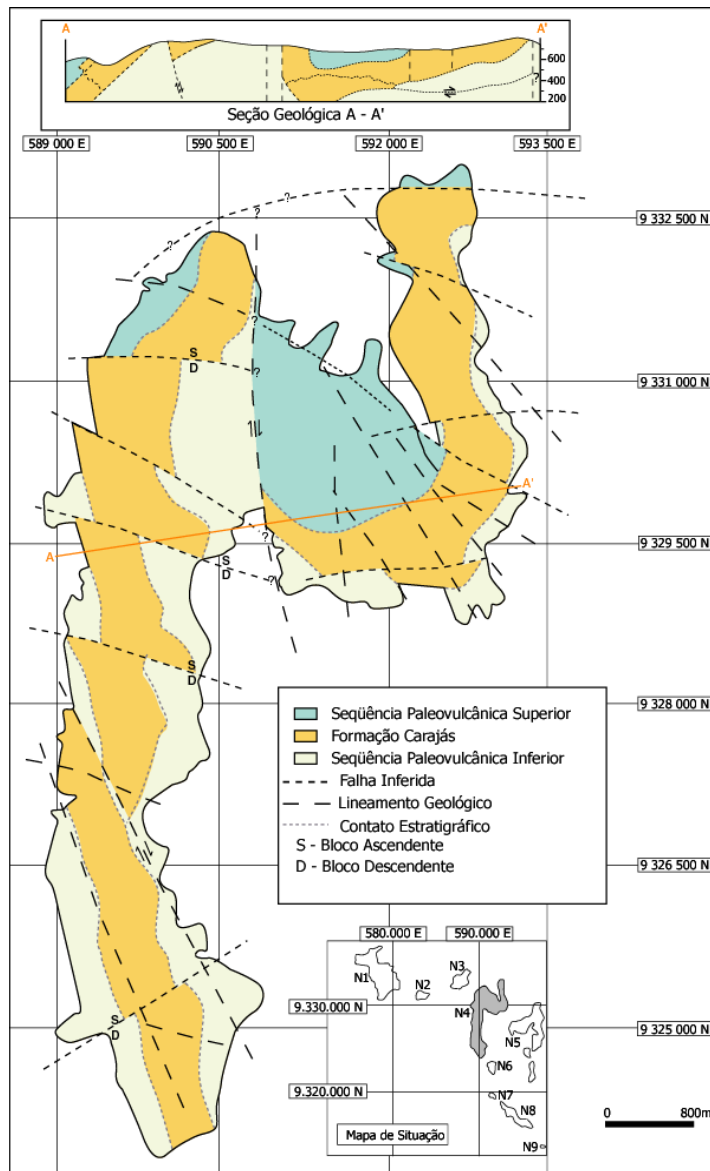


FIGURA 22 – Mapa geológico da Jazida de minério N4 de Carajás (COELHO, 1986).

A espessura original da formação ferrífera jaspilítica não é possível de ser definida, no entanto a espessura média do corpo de minério hematítico da jazida N4E é da ordem de 200 m, produzidos pela ação de processos de enriquecimento supergenênico (BEISEIGEL, 1982).

Apesar do contato com a Seqüência Paleovulcânica Inferior – Formação Paraupébas, geralmente, apresentar uma passagem brusca na base da formação ferrífera, são encontradas finas lentes de tufos básicos intercalados, pode ser indício de que a atividade vulcânica não tenha cessado completamente com o início da sedimentação da formação ferrífera e também, é indicativo de ser responsável pelas contaminações aluminosas e manganésíferas (BEISEIGEL, 1982).

A formação ferrífera da jazida N4E apresenta-se como um sinclinal com abas ortogonais e orientadas nas direções N-S e E-W, com mergulho axial para NW (FIGURA 22); essa estrutura é limitada a Oeste por uma falha de direção N-S, mergulho vertical e rejeito horizontal, que a separa da jazida N4W (BEISEIGEL, 1982).

A jazida N4E é dividida em dois corpos, Sul e Norte, separados por uma falha; apresenta características estruturais e econômicas distintas (GOMES, 1986). A geometria do corpo de minério lavrado tem a forma de “J”, com concavidade voltada para NW.

A lavra é executada pelo método tradicional, a céu aberto, com desenvolvimento vertical, realizada em níveis de bancada de 15 m de altura. Após perfuração e desmonte da bancada de minério, escavadeira de até 31m³ de capacidade, carregam caminhões fora de estrada de 240 toneladas, que levam o minério até os britadores primários fixos e semimóveis.

O custo de beneficiamento do minério de Carajás é reduzido pelo alto teor de ferro *in natura* da hematita (> 65 %, não há necessidade de ser concentrada). O processo de beneficiamento resume-se em britagem, classificação, lavagem, moagem e filtragem, gerando os produtos: *sinter feed*, *granulado*, *pellet feed* e Fino para Redução Direta (FRD).

A viabilização econômica do Projeto de Ferro Carajás, mina-ferrovia-porto, cuja construção levou sete anos (1980-87), envolveu várias adaptações, (<http://www.cvrd.com.br/src/frameset.html?LIN=/port&CAP=/geral&SEC=/sitemap>), tais como:

- Construção da Estrada de Ferro Carajás – EFC, (892 km de extensão) - traçado desenvolvido em terreno plano, envolvendo baixo volume de terraplenagem e sem túneis; 46 pátios de cruzamento, bitola de 1,6 m, em trilhos soldados

continuamente; 11,2 km de pontes e viadutos, sendo a ponte mais importante, a ponte sobre o Rio Tocantins (2,31 km);

- Construção de um porto para navios supergraneleiros – o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (Ilha de São Luís, Baía de São Marcos) – capacidade de carregar navios de até 420 mil toneladas de porte bruto; canal natural da Baía de São Marcos, totalmente sinalizado (100km de extensão, mínimo de 23m de profundidade e 500m de largura), facilitando o acesso dos maiores navios existentes;
- Construção de dois molhes: um ao norte, com 950 metros, outro ao sul, com 180 metros aparentes e 130 metros submersos, para minimizar a presença de correntes marítimas de grande intensidade.

IV – PROCESSO DE SINTERAÇÃO

Nos últimos anos a produção do aço tem aumentado. Em 2002, houve um aumento médio de 6,4% na produção do aço bruto mundial, que representou um recorde na produção passando de 900 Mtm (Milhões de toneladas métricas). Segundo Ian Christmas (Secretário Geral do IISI – *International Iron & Steel Institute*) “... esse recorde na produção de aço bruto em 2002 reflete: a recuperação econômica global e o aumento da demanda por aço na China e alguns países asiáticos. A demanda também demonstra a contribuição de aço junto ao desenvolvimento sustentável” (www.worldsteel.org - IISI *Annual Conference* Out/1999)

Da Antigüidade até o presente, grandes progressos dos processos siderúrgicos têm sido evidenciados, desenvolvendo-se melhorias: (1) na caracterização das matérias primas utilizadas; (2) no processo de beneficiamento e aglomeração do minério; e (3) nos processos metalúrgicos envolvidos. A correlação destes fatores visa à obtenção de processos siderúrgicos com melhor rendimento e produtos de melhor qualidade a um menor custo, os quais constituem a base de sustentação de uma usina siderúrgica (HUNDERTMARK, 1996).

O processo de sinteração começou a ser desenvolvido no início do século XX, com grande avanço nas últimas décadas. Este processo indireto surgiu devido à escassez ou à distância dos depósitos de minério tipo “*lump ore*” das usinas siderúrgicas e a necessidade de aproveitamento do minério fino de alto teor

existente. O minério de ferro fino passou a ser aglomerado por dois processos: pelletização e sinteração. Este último processo era utilizado, inicialmente, para indústria de metais não-ferrosos (sulfeto de cobre e de chumbo), desenvolvidos por *Dwight e Lloyd*.

A primeira máquina contínua de sinteração para o minério de ferro foi construída em 1910 na cidade de Birdsboro (Pensilvânia – EUA): tinha 1,07 m de largura por 7,8 m de comprimento, com a produção de 140 ton/dia (RICKETS, 1998). Até a década de 50, foram feitas modificações com relação à capacidade da máquina de sinteração. Após este período, iniciaram-se os estudos associados aos fatores que influenciam no rendimento do processo e na qualidade do produto sinter, tal como: composição da mistura, basicidade do produto sinter, economia de combustível, etc.

Atualmente, o fator mais importante no processo de sinteração é o binômio baixo custo/alta qualidade, ou seja, produção de sinter a custo menor e de melhor qualidade, que otimizem a produção do ferro-gusa nos altos fornos.

A usina siderúrgica, normalmente, é formada por um sistema interligado entre a planta de sinteração, os altos fornos e a aciaria. Esse sistema interligado permite que haja uma sincronia maior entre esses diferentes setores, levando a um maior rendimento em todos os processos. O sistema ideal ocorre quando a sinteração produz sinter adequado e de maior rendimento para o alto-forno, que por sua vez, produz ferro-gusa mais apropriado para o tipo produzido na sua aciaria.

IV.1 - Breve Histórico da Siderurgia

A siderurgia teve início desde os primórdios dos tempos, quando pedaços do minério de ferro foram utilizados ao redor de fogueiras para aquecer as cavernas dos povos primitivos. O minério era reduzido a metal pelo calor e pelo contato com a madeira carbonizada. Este novo material foi utilizado para a confecção de armas e artefatos agrícolas; desde então, tanto o processo siderúrgico quanto o seu produto passaram por grande desenvolvimento e, hoje, o aço continua a ser uma das matérias-primas mais importantes e versáteis, com aplicações nas mais diferentes áreas, desde artefatos básicos como painéis, até aços especiais, utilizados na indústria automobilística e espacial.

Na Antigüidade, a produção do ferro era conhecida por diversos povos, cada qual desenvolveu processos adequados a sua realidade e de acordo com as suas necessidades. Ver CASTRO (1989) e RICKETTS (1998), que mostram a história do desenvolvimento da siderurgia mundial.

O período de maior desenvolvimento da siderurgia ocorreu a partir do século XIX, com grandes avanços nas primeiras décadas do século XX, quando a Inglaterra passou a ser o núcleo da produção de aço, tornando-se a nação mais poderosa e dominando totalmente o mercado mundial. Pois, além de possuir carvão e minério de ferro, amplamente distribuídos por seu território, possuía também um sistema ferroviário que lhe facilitava o transporte de matérias primas (HUNDERTMARK, 1996).

A produção de aço em larga escala, em todo o mundo, deve-se a alguns fatores essenciais que ocorreram durante os dois últimos séculos, entre os quais podem ser citados: (a) substituição do carvão vegetal por carvão mineral; (b) descoberta dos processos de transformação do ferro-gusa em aço, primeiro pelo método de “*puclagem*”, depois pelos processos *Bessemer*, *Thomas* e *Siemens-Martin*; (c) o conhecimento das propriedades magnéticas do ferro e a descoberta de Oersted sobre os fenômenos eletromagnéticos, princípios que fundamentam a construção dos dínamos e dos motores elétricos; (d) a descoberta de Robert Hadfield sobre a melhoria das propriedades do aço pela adição de quantidades substanciais de manganês, fato que marca o início da era dos “aços especiais” (ABREU, 1973).

Após a Segunda Guerra Mundial até final da década de 70, a taxa média de crescimento anual da produção mundial de aço foi de, aproximadamente, 5%, passando por um período de estagnação entre 1979-1987 e um período de reestruturação iniciado em 1988; nesses dois últimos períodos a taxa de

crescimento mundial anual da produção de aço foi de apenas 1,1% (FIGURA 23) (ANDRADE et al., 2002).

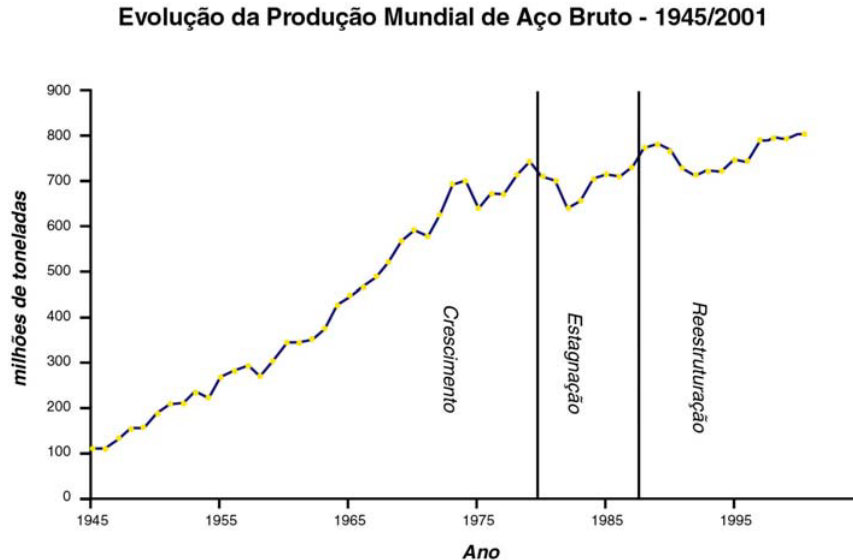


FIGURA 23 – Evolução da Produção Mundial de aço bruto – 1945/2001 (ANDRADE et al., 2002; FERREIRA, 2000).

A alta taxa de crescimento do primeiro período deveu-se à necessidade de reconstrução dos países assolados pela guerra, alavancando a atividade industrial e favorecendo o rápido desenvolvimento da economia de alguns países, como pode ser evidenciado pela grande contribuição no desenvolvimento dos processos siderúrgicos, nos últimos 40 anos, pelos países como Alemanha e Japão.

O período de estagnação da indústria siderúrgica ocorreu, devido aos seguintes fatores (ANDRADE et al., 2002):

- ✓ Estagnação da demanda nas economias desenvolvidas;
- ✓ Crescimento da aplicação de materiais substitutos do aço, como: plástico, alumínio e cerâmica;
- ✓ Acirramento da concorrência com a globalização;
- ✓ Necessidade de privatizações (70% das usinas siderúrgicas mundiais eram de empresas estatais);
- ✓ Conseqüente queda dos preços e rentabilidade pelo excesso de capacidade.

A necessidade de reestruturação da siderurgia mundial, iniciada em 1988, caracterizou-se por um grande processo de privatização na siderurgia mundial, sendo motivada principalmente, pela abertura e globalização de mercados. Nessa fase, houve uma maior demanda por usinas semi-integradas (de custo de implantação menor), forçando as usinas integradas (que utilizam altos fornos) a buscar maiores ganhos de produtividade. Devido ao excesso de oferta e à evolução tecnológica dos países em desenvolvimento, os países desenvolvidos impulsionaram suas siderúrgicas no sentido de: racionalizar a produção; desenvolver novas tecnologias de processos e incrementar a oferta de produtos.

Apesar do baixo custo de implantação do sistema semi-integrado, os especialistas acreditam que o sistema integrado deverá permanecer por, no mínimo 20 anos, devido a alguns aspectos que corroboram em sua defesa: siderurgia chinesa (mercado em ampla expansão) é basicamente integrada a alto-forno e apresenta grande contribuição na produção mundial; produção de aços especiais (necessita de especialização – restringindo o número de fabricantes por tipo de aço); grandes usinas são mais competitivas, sob o aspecto do mercado global.

No Brasil, os sistemas de usinas integradas são mais viáveis, devido aos baixos custos do minério de ferro e o alto preço da energia elétrica, sendo que a busca atual é por um melhor aproveitamento das instalações existentes.

Nos últimos anos, os mercados e, conseqüentemente, as indústrias consumidoras de aço tornaram-se cada vez mais exigentes, onde a qualidade do produto passou a ser fator fundamental para competição no novo ambiente globalizado. Os ambientes siderúrgicos apresentam-se com novas feições: mais internacional; menos empregador; mais concentrado e mais adaptado às novas questões ambientais.

A tendência da siderurgia mundial é adaptar-se à nova realidade de mercado; voltar os investimentos para plantas industriais menores e mais versáteis e com corporações detendo parcelas cada vez maiores da produção; recuperar, bem como, agregar propriedades e características diferenciadoras para a aplicação do aço, visando combater a sua substituição, cujo principal concorrente são os diferentes tipos de plásticos.

IV.1.1 – SIDERURGIA NO BRASIL

A produção de aço no Brasil teve início no século XIX, em pequenas siderúrgicas nos estados de Minas Gerais e São Paulo, sem grande êxito. Dois fatores afetaram o surgimento tardio da siderurgia no Brasil: a possibilidade de produção de aço mais barato e a falta de interesse dos detentores da tecnologia de construção de usinas siderúrgicas em passar a tecnologia a um cliente em potencial. Esses fatos eram intimamente ligados aos interesses políticos da época e poderiam alterar a relação de poder com os países ricos da época (PEREIRA, 1987).

No Brasil, durante o governo de Getúlio Vargas, em 1937, deu-se início à construção da primeira grande usina siderúrgica denominada Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda. A construção de usinas siderúrgicas no Brasil surgiu por interesse dos países aliados, pela necessidade de se produzir grande quantidade de aço, para a confecção de mais artefatos bélicos, com o prenúncio de uma Segunda Guerra Mundial (PEREIRA, 1987).

A partir da década de 50, ocorreu uma expansão na produção brasileira de aço, com a ampliação da Belga Mineira, existente desde 1921 e inauguração de novas usinas siderúrgicas: MANNESMANN (capital alemão – 1954), USIMINAS (associada às siderúrgicas japonesas – 1962), COSIPA (1965) e o início de funcionamento da Companhia de Ferro e Aço Vitória (PEREIRA, 1987; FERREIRA, 2000).

A construção de parques siderúrgicos estatais tinha como principal objetivo estratégico a sustentação do desenvolvimento, motivado por questões políticas e pela fragilidade do setor privado da época e também pela importância de grandeza e necessidade de promover a industrialização do país (ANDRADE et al., 2002).

Após longo período de estagnação, iniciou-se em 1988, o processo de reestruturação do setor siderúrgico brasileiro, como em todo o mundo. O processo de reestruturação brasileiro foi dividido em duas etapas: a primeira,

iniciada em 1988, com as privatizações de usinas siderúrgicas de pequeno porte (Cosim, Cimetal, Cofavi e Usiba), produtoras de aços longos, sendo absorvidas pelos Grupos Gerdau e Villares, através do Plano de Saneamento do Sistema Siderbrás; a segunda, período de 1991-93, através do Programa Nacional de Desestatização (PND), onde todas as usinas restantes foram privatizadas (ANDRADE et al., 2002).

O processo de privatização fortaleceu a siderurgia nacional que passou a ter independência política, comercial, administrativa e financeira, com racionalização de investimentos, redução de custos, modernização da produção e aproveitamento de sinergias, gerando melhorias e incrementos no trinômio: qualidade-competitividade-productividade; sendo relevantes também as inovações tecnológicas para processos e produtos, que contribuíram para mudar conceitos e decisões fundamentais ao desenvolvimento das empresas (ANDRADE et al., 2002; BDMG, 2002).

Atualmente 11 empresas são responsáveis por 98% da produção brasileira de aço (FIGURA 24); essa diminuição na quantidade de empresas, deve-se ao movimento de reestruturação do setor, onde foram formados cinco blocos operacionais, ou seja, houve uma segmentação da produção dos diferentes tipos de aço (TABELA 13).

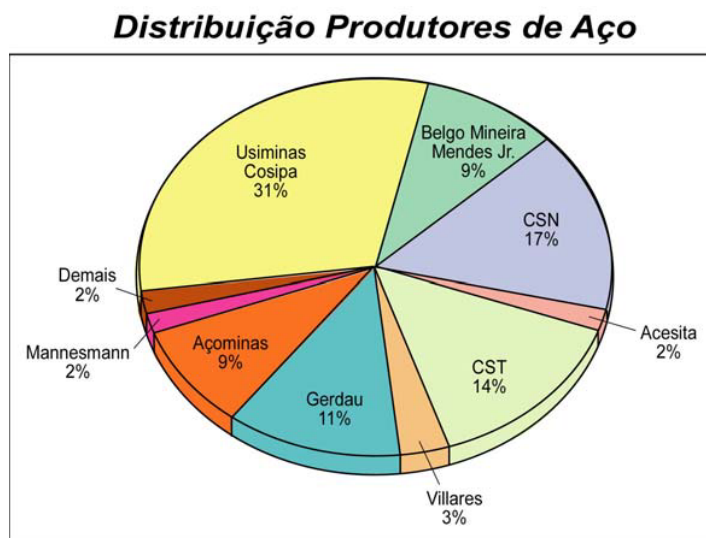


FIGURA 24 – Distribuição dos produtores de aço do Brasil em 2001 (ANDRADE et al., 2002).

Nos últimos anos, o Brasil tem-se mantido como 8º lugar entre os maiores produtores mundiais de aço e é o 5º maior exportador de aço (ANDRADE et al., 2002; BDMG, 2002; QUARESMA, 2002); pelas previsões do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) a produção de aço bruto deverá permanecer no patamar de 32 milhões de toneladas anuais.

Empresas	Produção (10 ⁶ t.)	Segmento	Mercados consumidores
Usiminas Cosipa	7,7	• Planos	Automotiva; Linha Branca; Tubos e Estruturas.
Gerdau Açominas	5,4	• Longos • Semi-Acabados	Automotiva, Construção Civil, Construção Mecânica (Aços Finos Piratini), e Infra-Estrutura
Acelor (Acesita CST Belgo Mineira)	7,2	• Planos • Semi-Acabados • Longos	Bens Duráveis Automotiva e Construção Mecânica Construção Civil
CSN	4,8	• Planos	Automotiva; Linha Branca e Embalagens.

TABELA 13 – Blocos operacionais da Siderurgia Brasileira (1997) (ANDRADE et al., 2002 - Fonte: BNDES).

O consumo aparente de aço em 2002 registrou queda de 3,1%, em relação ao ano de 2001 (CAMPOS, 2003 – IBS) e a sua distribuição está, principalmente, nos setores de Construção Civil (31,0%), Transporte (28,0%), Bens de Capital (11,0%) e Utilidade e embalagens (14,0%) (QUARESMA, 2002).

IV.2 – Descrição do Processo de Sinteração

O processo de sinteração do minério de ferro é um sistema complexo influenciado por muita variável. Esse processo pode ser explicado como uma mistura de matérias primas (minérios, adições, fundentes e combustível), homogêneas e sob umidade controlada, submetida a uma semifusão redutora-oxidante, cujo produto resultante, o sinter, passa por tratamento mecânico antes de ser levado ao alto-forno.

Atualmente, o sinter é portador de quase todos os compostos ou elementos necessários à fabricação do ferro-gusa e da escória do alto-forno (AZEVEDO, 1989; NAJAR, 1991). A variação na temperatura de sinteração possibilita a produção de dois tipos de sinteres com microtextura diferenciada: o sinter homogêneo e o heterogêneo (FIGURA 25).

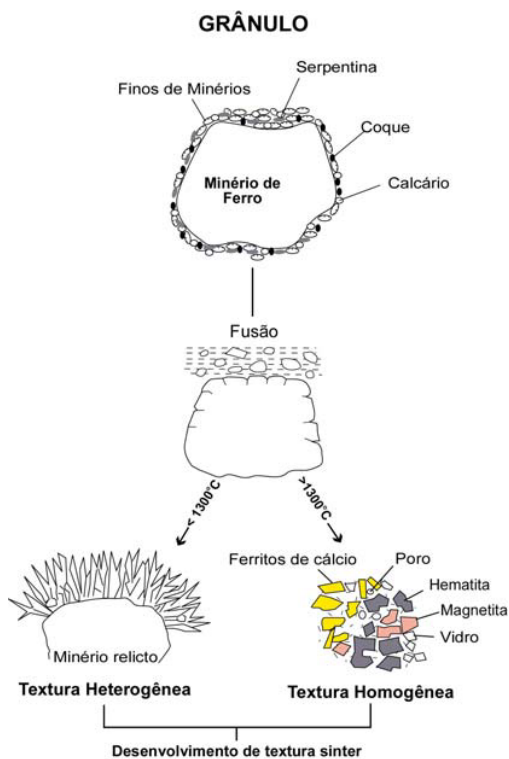


FIGURA 25 – Figura esquemática do desenvolvimento da textura do sinter (DAWSON, 1993).

O sinter de textura homogênea é produzido sob alta temperatura acima de 1300°C , cuja aparência visual é de homogeneidade, pois praticamente

todo material foi fundido (FIGURA 25). O sinter de textura heterogênea é produzido com temperatura abaixo de 1300°C , onde a maior parte das partículas primárias da mistura não participam da reação, durante o processo de sinteração, gerando sinter com aspecto heterogêneo (FIGURA 25).

O processo de sinteração pode ser realizado por dois tipos de máquinas de sinteração: a) *Greenawalt*, de processo intermitente, cuja unidade de produção é uma panela basculável com fundo de grelha e forno de ignição móvel, surgido no final do século XIX, encontra-se em franca decadência; b) *Dwight Lloyd*, que é contínuo, com esteira rolante para carga, fundo de grelha e forno de ignição fixo (FIGURA 26), surgido no século XX, mais recente e usado atualmente no mundo inteiro.

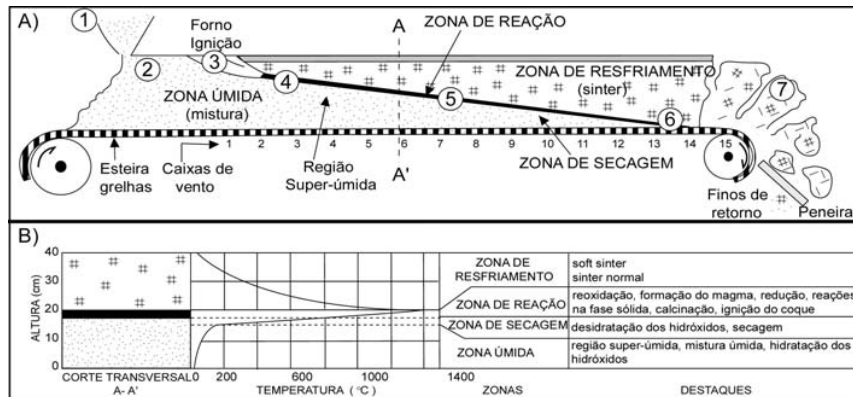


FIGURA 26 – (A) corte longitudinal de um leito de sinteração *Dwight-Lloyd*; (B) Corte transversal e perfil térmico de um leito de sinteração em um dado instante. (1-7) Descrição no texto. (Modificado de AZEVEDO, 1989).

O processo de sinteração é semelhante em ambas as máquinas; as diferenças encontram-se nos equipamentos e na forma de produção do sinter. Assim, podemos descrever o desenvolvimento do processo de sinteração da seguinte forma, conforme pode ser acompanhado na FIGURA 26:

1. A unidade de produção é carregada com a mistura a sinterar;
2. A mistura contém o minério de ferro, os fundentes e as adições, com uma certa quantidade de combustível sólido e umidade;
3. O combustível da camada superficial da mistura sob o calor gerado no forno de ignição entra em combustão, iniciando-se assim o processo de sinteração;

4. O ar é succionado de cima para baixo através da mistura por um sistema de exaustão para dar continuidade à combustão;
5. A camada superficial de combustão é transportada para o fundo do leito pelo fluxo de ar succionado, constituindo-se na frente de combustão;
6. Quando a frente de combustão atinge as grelhas, todo o coque da mistura deve ter sido queimado, gerando calor, vaporizando a água e calcinando os carbonatos, o que provoca uma semifusão e aglomera o material carregado;
7. O aglomerado, formado em grandes blocos, é então britado e peneirado, onde a fração superior a 5 mm é levada para os altos fornos e a fração inferior é considerada finos de retorno.

O mecanismo de sinteração é determinado pelo desenvolvimento simultâneo de dois fenômenos, transferência de calor e reações químicas, que resulta na formação de uma zona de reações termoquímicas interdependentes no leito da mistura a sinterar, gerando outras zonas com características diversas, cujos desenvolvimentos formam o mecanismo global de aglomeração a quente (FIGURA 27) (AZEVEDO, 1989; NAJAR, 1991).

Os desenvolvimentos desses dois fenômenos principais ocorrem das seguintes formas: transferência de calor (físico) - é proporcionada pela sucção forçada de ar da camada superior para a inferior do leito de sinteração, criando uma frente térmica, cuja velocidade de propagação é proporcional à vazão de ar; e a combustão do coque (químico) - produz calor, gerando uma frente de reação química, cuja evolução é função da reatividade e da quantidade de combustível e da umidade e composição química da mistura.

A FIGURA 27 mostra a ocorrência simultânea dos fenômenos de transferência de calor e de combustão do coque, que definem as zonas de sinteração e assim todo o processo de aglomeração da mistura. A curva A dessa figura indica a temperatura, evidenciando um aumento brusco de 60° para 1200°/1400° C, desencadeando todas as reações de sinteração. A curva B indica um deslocamento do perfil térmico do leito, ao longo do tempo, onde a frente física de propagação de calor se deslocou de A para B, promovendo um ciclo completo de reações físicas e químicas.

O desenvolvimento dessas zonas de sinteração será descrito a seguir (NAJAR, 1991):

A. **Zona úmida:** Nesta zona ocorre a reação de hidratação da cal, tem como limite de temperatura 100° C e inicia-se com a evaporação da umidade da mistura. O vapor é conduzido para as camadas inferiores mais frias; ao passar por 60/70° C (ponto de orvalho) é novamente condensado. Entre 60 e 100° C, forma uma região com umidade da mistura superior à média; acima desta, inicia-se a zona de secagem.

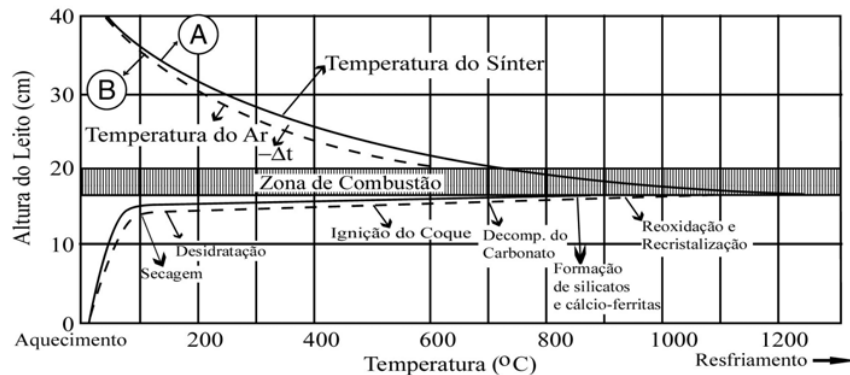
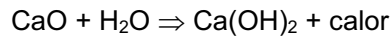
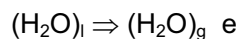


FIGURA 27 - Esquema de troca de calor no leito de sinteração e as temperaturas (de início) das reações de sinteração. Linha cheia: temperatura do sinter e linha pontilhada: deslocamento do perfil térmico do leito. (modificado de AZEVEDO 1989).

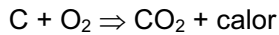
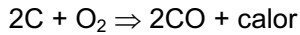
B. **Zona de secagem:** Compreende entre 100 e 500° C, região onde ocorre principalmente a vaporização da umidade da mistura e depois a desidratação dos hidróxidos. Entre 150 e 200° C toda a umidade já foi vaporizada, entre 150 e 500° C, inicia-se a desidratação dos hidróxidos; ambas as reações ocorrem consumindo calor do processo, como pode ser visto abaixo:



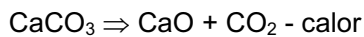
C. **Zona de reação:** compreende toda a região térmica acima de 500° C; inicia-se com a reação de combustão do coque e termina com o início do resfriamento do sinter. As principais reações do processo de sinteração ocorrem nesta zona e podem ser subdivididas em:

Reação de combustão do coque (exotérmica) - inicia entre 500 e 700° C, com violento desprendimento de calor, elevando o nível térmico do ambiente para

1200/1400° C. A queima do coque desenvolve-se com excesso de O₂, devido à pressão de sucção do ar descendente que atravessa a mistura. As reações que ocorrem são:



Reação de decomposição de carbonatos* (endotérmica) – essa reação inicia-se lentamente a 600° C, tornando-se violenta a partir de 800° C ou 900° C com forte absorção de calor, liberando o CaO que em contato com os óxidos de ferro tende a formar cálcio-ferritas ainda no estado sólido. Apresenta a seguinte reação:



Reações na fase sólida – essas reações ocorrem por substituição; são favorecidas pelo aquecimento da mistura e pelo contato entre as partículas de óxidos de ferro, CaO e SiO₂. A intensidade dos contatos entre essas partículas é o fator mais importante, pois a mobilidade dos reagentes, neste estado, é muito pequena. Os principais produtos dessas reações são: os compostos de óxido de ferro e cálcio (cálcio-ferritas) binários (2CaO.Fe₂O₃; CaO.Fe₂O₃; CaO.2Fe₂O₃) ou ternárias (CaO.FeO.Fe₂O₃; 3CaO.FeO.7Fe₂O₃; 4CaO.FeO.4Fe₂O₃; CaO.3FeO.Fe₂O₃), e os silicatos de cálcio, cuja formação é desprezível.

Reações de redução e reoxidação - iniciam na zona superior do aquecimento e só terminam com o início do resfriamento. A reação de combustão do coque, além de produzir grande quantidade de calor, ainda torna o ambiente ligeiramente redutor, onde favorece a redução parcial da hematita e magnetita. Ao iniciar o processo de resfriamento do sinter, o ambiente passa a uma atmosfera francamente oxidante, que ainda sob temperatura elevada, permite a reoxidação da magnetita.

Reações de Formação do Magma - são reações que ocorrem na frente de combustão, onde os componentes da carga, após sofrerem condicionamento pelas reações na fase sólida, entram em estado de semifusão e depois recristalizam-se rapidamente.

* A granulometria do calcário tem forte influência na sua decomposição, onde as partículas grosseiras não se decompõem totalmente durante a fase de aquecimento, sendo decomposto, às vezes, na fase de resfriamento; assim o CaO formado não tem tempo nem temperatura para reagir quimicamente, permanecendo inalterado no bolo do sinter, sendo uma das causas de fragilização do sinter.

D. **Zona de Resfriamento** - inicia-se abaixo de 900° C, quando o ciclo das reações químicas se completa e se inicia o resfriamento propriamente dito, com o surgimento dos primeiros cristais que definirão as propriedades do sinter.

O processo de sinteração envolve três etapas principais: preparação da carga, operação de sinteração e indicadores de operação (FIGURA 28). As duas primeiras etapas são controladas por diversas variáveis, cuja pequena variação pode produzir produtos totalmente distintos.

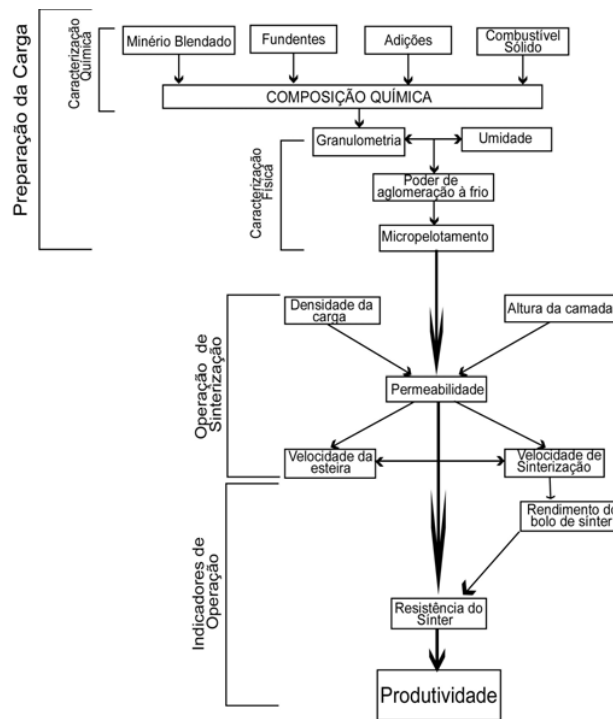


FIGURA 28 - Correlação entre a preparação da carga e produtividade do processo de sinteração (Adaptado de AZEVEDO, 1989; NAJAR, 1991).

A fase de preparação da carga tem sido muito estudada, devido ao grande número de variáveis relacionadas a esta fase, sendo estudada a caracterização do minério (PIMENTA et al., 1999 e 2000; CAPOLARI, et al., 1998; ROSIÈRE et al., 1997a, 1997b, 1998; GOLDRING & FRAY, 1993; SILVA NETO et al., 1981; entre outros); a caracterização dos fundentes (PEREZ & SERRA, 1996); a caracterização da mistura sob o aspecto de micropelotização e permeabilidade (ARAÚJO FILHO et al., 1986); e vários outros trabalhos relacionados a essa fase.

A fase de operação de sinteração também é bastante estudada, no entanto encontra-se mais associada à questão de implementação tecnológica do que caracterização de material, como por exemplo, no estudo de BASTOS et al. (1999), LOO (1998), COSTA PEREIRA & POOT (1988), entre outros.

A preparação da carga inicia no empilhamento das matérias primas, nos pátios primários, até a formação das pilhas homogeneizadas. A mistura de minério é feita pela combinação de vários tipos de minério de ferro, representada por uma mistura homogênea com características físicas, químicas e metalúrgicas adequadas ao uso na sinteração (minério blendado).

IV.2.1 - MINÉRIO DE FERRO

Atualmente, o minério de ferro utilizado pelas usinas siderúrgicas é denominado minério de ferro metalúrgico, que é uma mistura de diversos tipos de minérios geológicos. Cada usina trabalha com um ou mais tipos de minério metalúrgico com características químicas, físicas e metalúrgicas adequadas ao seu processo.

As características geológicas de cada minério encontram-se obliteradas pela mistura de vários tipos de minérios, ainda que as características do minério que compõe a maior parte da mistura prevaleçam, mas de maneira incipiente.

O minério pode ser classificado como minério base e minério de adição (LEMOS et al., 1978). O primeiro é utilizado em maior proporção, devido às suas características físicas e químicas; e o segundo é utilizado em menor proporção, para correção do minério base, pois este minério apresenta características físicas e químicas especiais.

Essa distinção é devida às especificações de minérios com as propriedades químicas e físicas exigidas pelo processo de sinteração. O minério é testado e classificado de acordo com as necessidades do processo, onde são observados: o índice de granulação, a distribuição granulométrica ou de teores químicos, associados ao aspecto de disponibilidade e/ou custo, definindo qual (is) será (ão) o(s) minério(s) base(s) e de adição (ões). A partir disso, os minérios são divididos nos tipos acima citados.

As características químicas ideais, que o minério de ferro deve apresentar, variam de uma usina para outra; como já enfatizado. Isso porque a definição de sua composição química apresenta uma faixa bastante ampla, que depende, principalmente, do balanço de carga do alto-forno utilizado. Para essa definição, é observada a participação do sinter na carga metálica e, principalmente, a sua qualidade, a natureza e o volume de escória produzida para obtenção do ferro-gusa.

De uma maneira geral, espera-se que o minério deva conter um alto teor de ferro; baixo grau de impurezas, como: P, Al, S, Ti, Si e álcalis e perda ao fogo (PPC). Na TABELA 14 temos alguns dos compostos contaminantes predominantes e suas principais características e influências no desempenho do processo de sinteração (CARNEIRO et al., 1985; VIEIRA et al., 1998).

O fator mais importante na caracterização química de um minério é a homogeneidade de sua composição, pois sua constância é primordial para o controle efetivo da qualidade do sinter. Os minérios de ferro, utilizados nas usinas siderúrgicas, geralmente, são de várias minas, onde a homogeneidade da composição do minério é atenuada, através de um sistema eficiente de estocagem e preparação de carga para a sinteração.

As principais características físicas dos minérios de ferro para sinteração são a granulometria e o poder de aglomeração a frio (PAF), sendo dada pouca importância a outras características físicas, como densidade, porosidade, forma do grão, presença de água combinada, etc., mais devido à falta de informação e métodos eficazes de avaliação, do que pela falta de importância (AZEVEDO, 1991).

A distribuição granulométrica ideal dos minérios de ferro para sinteração obedece à curva de *Astier* (Figura 29). Essa curva estabelece que os minérios devem ter sua granulometria limitada pelas malhas de 6,35 mm e 150

mesh (0,105 mm) e, aproximadamente, 50% do minério deve estar acima de 1mm (CARNEIRO et al., 1984). A partir disso, as produtoras de minério de ferro procuraram adequar sua produção para que atendessem essas exigências operacionais.

Composto	Faixa	Distribuição Granulométrica	Observações relevantes
Sílica	Varia em função da basicidade e volume de escória do sinter	<ul style="list-style-type: none"> Utilizar minérios, onde a sílica esteja nas frações mais finas (<1,0 mm), o que contribui para diminuir o tempo de sinteração e aumentar a produtividade; visto que ajuda na formação de SFCA. A sílica não deve estar oclusa dentro das partículas primárias nucleantes de minérios. 	<ul style="list-style-type: none"> O menor desvio padrão da basicidade do sinter é obtido quando o teor de sílica na mistura não precisa ser ajustado pela adição de fundentes. Evitar a concentração de sílica da mistura nas frações > 1,0 mm, pois poderá não participar das reações de sinteração, diminuindo volume real de escória e fragilizando o sinter (aumento de RDI). Baixo teor de sílica implica menor volume de escória no alto-forno e menor consumo de fundentes.
Alumina	Varia em função da basicidade e volume de escória do sinter	<ul style="list-style-type: none"> Evitar concentração nas frações mais finas dos minérios (<150 <i>mesh</i>). A alumina não deve estar oclusa dentro das partículas primárias nucleantes de minérios. 	<ul style="list-style-type: none"> Uma maior quantidade de alumina nas frações mais finas aumenta fortemente o RDI do sinter. A alumina nas frações mais grossas pode não participar das reações de sinteração. A alumina na forma de gibbsita associa-se à hematita secundária mais facilmente do que a caulinita. Baixo teor de alumina implica um menor volume de escória no alto-forno.
Fósforo	Varia em função do Processo de cada empresa.	<ul style="list-style-type: none"> Normalmente, a sua concentração é maior nas frações mais finas dos minérios. Predominantemente nas partículas primárias aderentes. 	<ul style="list-style-type: none"> É prejudicial à qualidade do aço, pois todo fósforo presente na carga ferrífera do alto-forno, vai para o ferro-gusa, prejudicando a qualidade final do aço. Geralmente, o teor de fósforo aumenta quando se aumenta a quantidade de goethita nos minérios; Alto teor de fósforo implica custos adicionais, com o processo de desfosforização do ferro-gusa ou do aço.
PPC ou Perda ao fogo	Varia em função do balanço de massa no alto-forno de cada empresa	<ul style="list-style-type: none"> Os minérios hidratados também chamados de goethíticos, apresentam valores maiores de PPC do que os minérios anidros. 	<ul style="list-style-type: none"> Um aumento do PPC dos minérios da mistura provoca contração do bolo na sinteração, formando trincas grandes que favorecerão a passagem preferencial de ar no leito; Uma dosagem adequada dos minérios goethíticos e anidros favorece a etapa de microaglomeração e aumenta a produtividade da máquina de sinterar.

TABELA 14 - Observações relativas aos teores de sílica, alumina, fósforo e ppc de minérios para sinteração (Modificado de CARNEIRO et al., 1985 e VIEIRA et al., 1998).

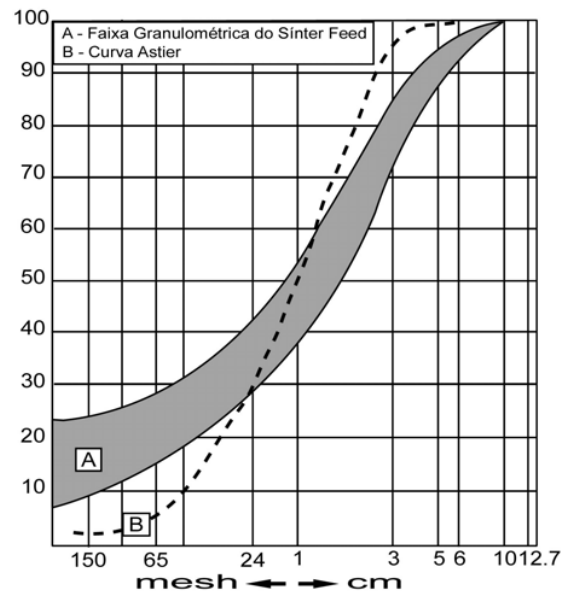


FIGURA 29 - Distribuição granulométrica do *sinter feed* (Modificado de AZEVEDO, 1989).

Estudos têm sido feitos no sentido de conhecer o comportamento de diferentes granulometrias de minérios durante o processo de sinteração, observando-se que a distribuição granulométrica da curva de *Astier* da fração *sinter feed* poderia ser ampliada, passando a ser uma faixa granulométrica (FIGURA 29), sem que prejudicasse o rendimento da planta de sinteração. BENTES et al. (1994) observaram que o aumento na quantidade de superfinos aumentou a produtividade no processo de sinteração.

A ampliação para uma faixa granulométrica permite maior e melhor aproveitamento dos minérios, visto que a separação do minério de ferro, em diferentes distribuições granulométricas, é feita na própria mineração.

A granulometria é uma característica física importante para todos os componentes da mistura, visto que a quantidade de determinadas frações granulométricas das partículas primárias presentes influencia no PAF da mistura. Apesar de não haver um ensaio padronizado para a determinação do PAF, a faixa granulométrica do minério pode ser dividida de acordo com os tamanhos das partículas primárias, mostrada na TABELA 15.

O estudo do PAF mede a capacidade de aglomeração do minério metalúrgico e dos outros componentes presentes na mistura. O tamanho das

partículas primárias separadas numa faixa de distribuição e sob uma certa umidade, propicia a geração de micropelotas (FIGURA 30).

Tamanho de Partícula	Tipo de partícula primária	Observações relevantes
> 0,7 mm	Nucleante	<ul style="list-style-type: none"> Servem de núcleo para aglomeração a frio das partículas primárias mais finas; A faixa mais adequada é entre 1 mm e 3mm.
0,7 mm a 0,2 mm	Intermediárias	<ul style="list-style-type: none"> Não servem nem de núcleo e nem como aglomerantes Devem ser evitadas na mistura a sinterar.
< 0,2 mm	Aderente	<ul style="list-style-type: none"> Servem de aglomerantes e formam a camada de aderência em torno das partículas primárias nucleantes.

TABELA 15 - Características das partículas primárias do minério de ferro (Modificado de AZEVEDO, 1991 e VIEIRA et al., 1998).

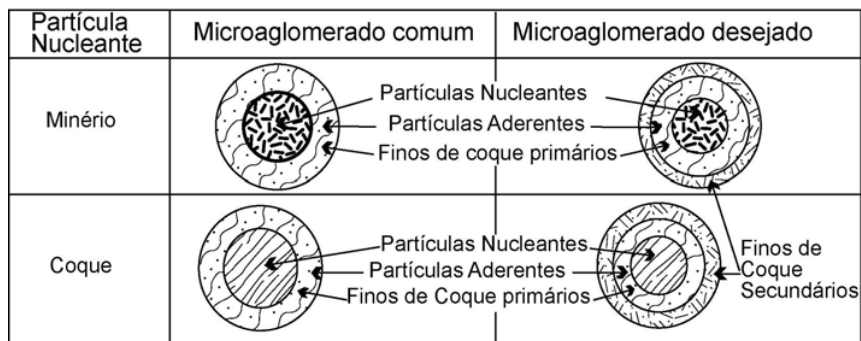


FIGURA 30 – Figura esquemática mostrando a geração dos tipos de micropelotas produzidas e desejáveis.

A eficiência do PAF influi diretamente na permeabilidade do leito, que é o fator de maior importância no processo de sinteração, visto que sua eficiência propicia um melhor desempenho da frente de combustão que, por conseguinte, aumenta a produção e melhora a qualidade do produto.

A proporção de partículas primárias ideal é variável e depende dos tipos de matérias-primas utilizadas, mas deve ser de tal forma que permita a maior geração de micropelotas possível que, conseqüentemente, propicia maior permeabilidade do leito de sinteração. Geralmente, isto ocorre quando a mistura contém maior quantidade de partículas primárias aderentes e nucleantes e o mínimo de partículas primárias intermediárias (CARNEIRO et al., 1985; ARAÚJO FILHO et al., 1986).

Na FIGURA 30 observa-se a correlação das partículas primárias nucleantes e aderentes no processo de microaglomeração. É desejado que os finos de coque fiquem na camada externa destes microaglomerados que, quando submetidos ao calor da ignição, provocam uma semifusão da parte externa, deixando o núcleo, parcialmente inalterado, produzindo assim um sinter *heterogêneo*. As vantagens deste tipo de sinter são: o menor consumo de combustível e sua maior resistência mecânica (VIEIRA et al., 1998).

Alguns estudos têm demonstrado que a elevação da quantidade de finos de minério de ferro na mistura torna as reações de sinteração mais eficientes. Esta elevação não prejudicaria o rendimento e produtividade do processo, apesar de dificultar a condutividade térmica dos núcleos, que comprometem a resistência do sinter, sendo, às vezes, preferível menor participação destas partículas primárias na mistura, quando observado o aspecto de resistência do sinter (BENTES et al., 1994).

O comportamento das partículas primárias nucleantes é fundamental no processo de sinteração pela produção de sinter heterogêneo. Essas partículas, quando submetidas a altas temperaturas, permanecerão intactas por estarem associadas à resistência do sinter, portanto, deverão apresentar alta resistência.

A presença das partículas primárias intermediárias é prejudicial ao processo de sinteração, pois não se comportam nem como nucleantes nem como aderentes, penetrando nos interstícios das micropelotas, reduzindo assim a permeabilidade do leito.

IV.2.2 – FUNDENTES E ADIÇÕES

Os fundentes são utilizados para escorificar as impurezas introduzidas na carga, tanto pelos minérios como pelo combustível sólido (LEMOS

et al., 1978). Além disso, fornece a matriz de escória, promovendo maior coesão entre os grãos do minério e aumentando a resistência do sinter a ser utilizado no alto-forno. Os fundentes utilizados geralmente são: calcário, cal, dunito, dolomita e quartzito (areia).

O calcário é o principal fundente utilizado, sua presença na mistura é bastante significativa. Outro fundente utilizado é a dolomita, cuja granulometria pode influir negativamente nas propriedades a frio do sinter; no entanto, quando utilizada numa granulação fina (0,063 mm) apresenta uma cinética de dissociação mais favorável, tornando-se mais reativa no processo de sinteração (PEREZ & SERRA, 1996). Quanto mais efetivo for o processo de calcinação, melhor para o processo de sinteração, pois a calcinação está associada ao processo de escorificação, que é fundamental para a qualidade do sinter (PEREZ & SERRA, 1996).

As adições são utilizadas para corrigir alguma característica da mistura ou para o reaproveitamento de resíduos gerados na operação da usina (LEMOS et al., 1978). Exemplos de adições: carepa de laminação, lixo industrial, pó de alto-forno, escória de alto-forno, minério de manganês, etc.

Os termos fundentes e adições têm-se tornado cada vez mais difícil de distingui-los, visto que alguns componentes introduzidos na mistura podem ser definidos tanto como fundentes quanto como adições, como o caso do dunito, que contém MgO, CaO e SiO₂ e a cal virgem, que aumenta a produção (LEMOS et al., 1978). O dunito é definido como fundente por apresentar teores elevados desses compostos e por melhorar algumas propriedades metalúrgicas do sinter; poderia ser denominado de adição (LEMOS et al., 1978).

Os fundentes são classificados em básicos (CaO e/ou MgO) e ácidos (SiO₂ e/ou Al₂O₃). A utilização de um ou de outro fundente dependerá do tipo de ganga dos minérios. Se for ácido, adiciona-se básico e vice-versa, de maneira a produzir um sinter com a basicidade adequada ao alto-forno. À avaliação do fundente deve-se observar, além dos resultados de sinteribilidade, a sua disponibilidade, custo, meios de transporte, e principalmente, à sua distribuição granulométrica.

O sinter é classificado como: a) auto-fundentes, quando proveniente de minério ao qual não necessita acrescentar nenhuma base (CaO ou MgO) para correção de sua composição química; b) não auto-fundente, quando há

necessidade de acrescentar algumas bases, sendo ácido quando $\text{CaO/SiO}_2 < 1$ ou básico quando $\text{CaO/SiO}_2 > 1$.

O índice de basicidade dos sínteres, como um fator controlador da qualidade do produto sínter, iniciou-se na década de 50, quando se produzia apenas sínter ácido. Nos últimos anos, sofreu modificação significativa, passando a produzir sínter básico. Este tipo de sínter permite uma fonte de fluxo pré-calcinado nos altos fornos, resultando numa economia da taxa de combustível.

Os fundentes e adições devem apresentar características físicas e químicas para que sejam totalmente incorporados ao sínter. Para que isso ocorra, a sua granulometria deve ser tanto quanto possível próxima à granulometria dos minérios principais, visando à integração máxima com a mistura. No entanto, devido à diferença na reatividade, a granulometria dos fundentes é limitada entre 2,8 mm e 0,105 mm, visto que os carbonatos grosseiros podem não queimar totalmente e, ao permanecer no bolo do sínter, podem provocar sua fragilização.

IV.2.3 – COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis são materiais que se queimam em contato com o ar, sob condições próprias, gerando calor. Na sinteração são utilizados dois tipos de combustíveis com finalidades distintas:

- Combustível gasoso ou líquido - é queimado no forno de ignição com excesso de ar, para acender o combustível sólido da mistura, desencadeando o processo de sinteração;
- Combustível sólido - integrante do leito de sinteração, queima em contato com o ar e tem a finalidade de fornecer calor necessário ao processo e promover a permeabilidade controlada no interior da mistura, deixando vazios (poros) à medida que se queima.

O combustível para a sinteração deve possuir elevado poder calorífico, reatividade média, granulometria e composição química adequada, normalmente, é utilizado o coque. Ou seja, deve ter alto teor de carbono e baixo teor de enxofre (pois este será eliminado nos gases de exaustão, sendo prejudicial tanto para os equipamentos, quanto para o meio ambiente, por formar gases corrosivos e tóxicos).

A granulometria ideal para o coque fica em torno de 0,5 a 3,36 mm, visto que frações mais grossas necessitam de um tempo maior de queima, aumentando a duração do processo de sinteração, reduzindo a velocidade de sinteração e conseqüentemente, diminuindo a produtividade da máquina de sinter. Enquanto, as frações mais finas apresentam uma reatividade maior, reduzindo a temperatura o tempo de sinteração, resultando num maior consumo de coque, portanto num menor rendimento do processo.

IV.2.4 – OPERAÇÃO DE SINTERAÇÃO

A operação de sinteração envolve procedimentos de adequação da máquina de sinteração à mistura de composição ideal para ser utilizado no alto-forno. Após a caracterização dos componentes dessa mistura, busca-se fazer o ajuste da máquina de sinteração para obter sua maior produtividade.

A produtividade é entendida como a obtenção de uma produção de sinter com alto rendimento, alta qualidade e um custo baixo. Dentre os ajustes, a serem feitos, a permeabilidade do leito, conforme pode ser observado na FIGURA 27, é um dos mais importantes e a sua eficiência influencia nos principais parâmetros de avaliação do sinter, ou seja, produtividade, custo e qualidade do produto sinterado.

A permeabilidade do leito pode ser determinada pela fórmula:

$P = Q.A^{-1}/(H.S^{-1})^n \Rightarrow$ (P - permeabilidade da mistura; Q - vazão de gás que atravessa a mistura; A - área da máquina; H - altura da camada; S - pressão da sucção; e n - função do tipo de escoamento (0,5 a 1,0)).

Os fatores, abaixo relacionados, exercem influência direta sobre a permeabilidade e poderão ser corrigidos quando a produção ou a qualidade do sinter não adequadas para uso nos altos fornos que são:

- A altura da camada ideal é o ponto de equilíbrio entre a máxima eficiência térmica com a máxima permeabilidade do leito.
- A densidade da carga é indicada pelo índice de vazios (v), existentes na carga e influencia na permeabilidade do leito (P). É dependente da granulometria e da forma dos grãos dos materiais que compõem a mistura; será ideal quando tiver uma boa compactação e uma boa permeabilidade da carga.
- A pressão de sucção é um indicador da eficiência da permeabilidade do leito. O nível da pressão de sucção dependerá das características dos tipos de minério de ferro. Será mais alta no início do processo, pois a mistura está quase totalmente crua; mais baixa na fase intermediária, visto que a mistura apresenta-se semifundida; e mais alta no final, pois o sinter é mais poroso.

Atualmente algumas usinas siderúrgicas utilizam o sistema ISF (*Intensified Sifting Feeder*), que é um equipamento com a função de intensificar a segregação granulométrica e química ao longo da altura do leito de sinteração, aumentando a permeabilidade da mistura.

A utilização desse sistema é feita atualmente pela USIMINAS, onde apesar da necessidade de ajuste de todo o processo operacional trouxe um aumento da permeabilidade do leito, permitindo trabalhar com alturas de camadas superiores às originais, aumentando a produtividade da máquina de sinteração (BASTOS et al., 1999). PIMENTA et al. (2000) observaram que a necessidade de adição de maior quantidade de partículas primárias nucleantes de minérios, através do estudo da adequação da granulometria para utilização do ISF, permitiu uma elevação na permeabilidade do leito e um conseqüente aumento do rendimento e da produtividade de sinter.

IV.3 – Eficiência dos Indicadores de Operação

A análise da eficiência do processo de sinteração pode ser verificada através de vários parâmetros e a qualquer instante: pela pressão de sucção; temperatura dos gases nas caixas de vento e no exaustor; análise das características físicas, químicas e metalúrgicas do sínter produzido; proporção de finos de retorno, gerados e consumidos, composição química dos gases, e rendimentos da sinteração.

O controle da temperatura dos gases é feito por meio da medida da temperatura sob as caixas de vento, que indica de forma precisa o desempenho térmico do processo de sinteração, obtendo-se, assim, uma indicação indireta da qualidade e produção do sínter.

A temperatura é mais alta sob o forno de ignição; à medida que a mistura se afasta do forno de ignição, há um decréscimo da temperatura durante o período de trocas térmicas entre o gás succionado e a mistura e, quando a frente de combustão atinge o final da esteira (nas últimas caixas de vento), a temperatura aumenta até atingir o ponto final da queima. O ponto final da queima é controlado na penúltima ou antepenúltima caixa de vento, visto que a última (ou as duas últimas) é (são) reservada (s) para o resfriamento do sínter.

A produtividade do sínter será tanto maior quanto menor for a proporção dos finos de retorno (sínter com granulometria <5 mm). No entanto, apesar de desejar-se uma menor quantidade destes finos de retorno, a sua utilização em níveis adequados na mistura a sinterar, mostra uma influência positiva na produtividade e no consumo de combustível, pois o processo é favorecido pela sua granulometria e pelo calor transferido para a mistura.

O rendimento do processo é medido de duas formas, por meio da:

- ⇒ Mistura parcial = sínter produzido/(minérios de ferro+fundentes+adições), levando-se em conta também a perda ao fogo e pelo transporte das matérias-primas.
- ⇒ Mistura total = sínter produzido / mistura parcial+coque+finos de retorno+ falsa-grelha.
- ⇒ Rendimento do bolo de sínter é obtido pelas proporções relativas de sínter e retorno produzidos.

Os estudos realizados nessa área buscam uma otimização do processo de sinteração utilizado, através do melhor conhecimento do comportamento da matéria-prima e/ou das variáveis operacionais do processo. Assim, geralmente os estudos feitos são bastante específicos, onde se observa uma variante do processo, mantendo-se as outras constantes, a fim de obter sua correlação com a qualidade do produto resultante, através dos indicadores de operação.

IV.4 – Indicadores de Qualidade

Os sínteres produzidos atualmente são constituídos por uma parte fundida e outra não fundida (sínteres heterogêneos), razão pela qual se procura fundir apenas as partículas primárias aderentes, preservando os núcleos dos microaglomerados. Assim, utiliza-se um menor aporte térmico possível, sem prejudicar as propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas capaz de garantir um excelente desempenho no interior dos altos-fornos. Para isto, é necessário um forte controle nas diversas variáveis que regem o processo, bem como melhor

conhecimento dos atributos microestruturais dos minérios de ferro conjugado com as suas características granuloquímicas (VIEIRA et al., 1998).

O aumento sucessivo das capacidades de produção dos altos-fornos fez com que fossem necessários controles mais rígidos da qualidade do sinter, visando sempre à maior eficiência da produção do ferro-gusa e, conseqüentemente, melhor qualidade do produto final, o aço.

A composição química do sinter é um fator razoavelmente fácil de controlar, devido à grande quantidade de tipos de minério ofertado no mercado. Para o sinter ser considerada matéria-prima, adequado aos altos-fornos, são executados alguns ensaios para avaliar as suas características físicas e metalúrgicas.

Os ensaios realizados são de baixo custo, facilidade de execução e, principalmente, para que seus resultados reproduzam o fenômeno metalúrgico de como o sinter se comportaria nos altos-fornos.

Os tipos de ensaios utilizados por cada empresa são padronizados de acordo com as características de seus processos e equipamentos. Esses testes são realizados com a finalidade de tornar o processo siderúrgico eficiente, devendo o sinter apresentar algumas características básicas:

- Alta resistência mecânica à queda e abrasão;
- Alta porosidade e redutibilidade e baixa degradação à redução;
- Granulometria e composição química controladas;
- Inexistência de elementos indesejáveis aos altos-fornos;
- Custo de produção o mais baixo possível.

Os testes, geralmente, realizados para determinar a qualidade do sinter, estão descritos de forma resumida abaixo (no CAPÍTULO I, no subitem Metodologia tem-se uma descrição mais detalhada):

Resistência a frio - os testes utilizados são o de tambor e o de queda (*tumbler* e *shatter tests*) para a determinação da resistência a frio, que constitui um dos principais indicadores de qualidade do sinter. Suas variações indicam alterações sensíveis na operação de sinteração.

Resistência a quente - o teste utilizado é o RDI (*Reduction Degradation Index*), mede a degradação do sinter quando submetido às condições

redutoras no alto-forno. Apesar de o sinter apresentar uma menor resistência que o minério e as pelotas, essa deficiência aparente é minimizada com um controle mais severo deste parâmetro, diminuindo-se a faixa de variação.

Redutibilidade do sinter - indica a disposição do sinter em liberar o oxigênio pelo agente de redução; considerado um fator de suma importância, procura-se manter este índice acima de 65%; para isso devem ser controlados: a basicidade, o volume de escória e o teor de FeO.

V – CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO

As indústrias siderúrgicas modernas têm buscado adequar sua tecnologia de fabricação do sinter, de acordo com as exigências dos altos-fornos; mercado globalizado, a realidade das minerações fornecedoras e a legislação ambiental (cada vez mais rigorosa); visando à otimização da produtividade e baixo consumo de energia no processo (SOUZA NETO et al., 1996; CAPOLARI et al., 1998, VIEIRA et al., 1998).

Segundo os dados da *American Iron and Steel Institute* (AISE) para cada 1000 kg métricos de aço produzido, aproximadamente 1000 kg métricos de minério de ferro (incluindo aglomerados) são consumidos (POVEROMO, 1999). Com base nesses dados e observando a tendência do comércio mundial de aço, pode-se esperar que haja um aumento no consumo do minério de ferro ou que, pelo menos, seja mantida a demanda atual nos próximos anos.

Grandes avanços científicos têm-se voltado ao conhecimento de engenharia aplicados na indústria, no sentido de otimizar o processo de sinterização. Mais recentemente, há uma preocupação em estabelecer uma correlação entre as características do minério de ferro e o seu comportamento ou desempenho no processo de sinterização (SOUZA NETO et al., 1999; CAPOLARI et al., 1998; VIEIRA et al., 1998; ROSIÈRE et al., 1996a e 1996b).

Nas duas últimas décadas, diversos estudos foram desenvolvidos, no sentido de correlacionar as características microestruturais dos finos de minérios e a sua eficiência no processo de sinterização, visto que o tamanho, forma e distribuição dos cristais e poros dos minérios podem influenciar na redutibilidade do sinter (SOUZA NETO et al., 1999; CAPOLARI et al., 1998); composição mineralógica da mistura pode influenciar no RDI e resistência mecânica (PIMENTA et al., 1999; VIEIRA et al., 1998); entre outros.

Evidências atuais têm demonstrado que há necessidade de uma cooperação mútua entre a metalurgia, mineração e geologia, porque onde termina a influência de uma área inicia-se a de outra. Essa cooperação tem sido buscada pelas grandes empresas de mineração e pelas próprias usinas siderúrgicas.

A homogeneização dos termos utilizados na caracterização do minério de ferro beneficiará ambos os lados. Esse conhecimento prévio permitirá aos mineradores um melhor gerenciamento das minas com fornecimento de minério selecionado para diferentes clientes e, para os siderúrgicos, a garantia um produto mais homogêneo (SOUZA NETO et al., 1999).

A qualidade de minérios de ferro para sinterização passa por avaliações técnicas diferenciadas, tanto por parte das minerações quanto pelas siderúrgicas. A forma de caracterização do minério em cada área demonstra o enfoque dado ao tipo de minério a ser utilizado, cujas classificações são feitas para otimizar melhor o seu processo.

Os siderúrgicos classificam o minério, principalmente, de acordo com a granulometria e teor de ferro adequado ao seu processo siderúrgico. Os mineradores classificam-no de acordo com o tipo de tratamento e forma de beneficiamento, relacionados principalmente à friabilidade do minério e ao teor médio de ferro; os geólogos apresentam uma caracterização mais intrínseca do minério, associando o corpo de minério com a sua gênese e contexto tectônico, através de sua composição mineralógica, microestruturas e texturas apresentadas.

Atualmente, tem-se buscado a caracterização do minério de ferro sob o enfoque da ciência dos materiais e engenharia dos materiais, onde o minério passa a ser tratado como um material policristalino (SOUZA NETO et al., 1999; ROSIÈRE et al., 1996). Essa correlação conjuga os parâmetros caracterizados por diferentes estruturas e texturas resultantes da atuação dos processos geológicos durante sua evolução, com as propriedades e/ou características granulométricas,

químicas, físicas e metalúrgicas. A correlação dos parâmetros dessas áreas constitui uma nova abordagem do controle do processo de operação das usinas siderúrgicas, sendo, então, denominados de parâmetros geometalúrgicos (PIMENTA et al., 1999; ROSIÈRE et al., 1996a; 1996b; VIEIRA et al., 1998; 2000).

O minério de ferro brasileiro utilizado nos processos de aglomeração é constituído predominantemente por hematita e quartzo, é denominado de tipo hematítico. O minério hematítico pode ser dividido em subtipos como: martíticos, granulares, microgranulares, especularíticos e goethíticos; este último é utilizado quando a quantidade de goethita presente interfere no comportamento de sinterização, visto que os elementos deletérios geralmente estão associados aos minerais hidratados.

As denominações utilizadas são dadas de acordo com os tipos de cristais de hematita (especular, martita, granular e microgranular) presentes. Alguns estudos têm demonstrado que minérios compostos por diferentes tipos de minerais predominantes apresentam comportamento siderúrgico diferenciado (CVRD, 1998; SANTIAGO et al., 2000; entre outros). O comportamento diferenciado de cada tipo de minério hematítico, durante o processo de sinterização, faz com que seja necessário um estudo mais específico sobre o assunto.

A grande vantagem do minério brasileiro é o seu alto teor de ferro, baixo teor de alumina, fósforo e perda ao fogo em comparação com minérios de outros países: daí o seu grande valor para as usinas siderúrgicas. Minérios com baixos teores de ganga e impurezas reduzem o volume de escória produzida, promovendo o enriquecimento do sinter, e conseqüentemente, o aumento da produtividade e redução do consumo de coque.

V.1 – Características dos Minérios de ferro

O conhecimento geológico do minério é baseado na história registrada pela rocha durante a sua evolução. As diferentes intensidades ou graus dos eventos geológicos, que afetaram os corpos de minérios, permitem gerar minérios com tipos de seqüência de cristalização dos minerais de ferro distintos, bem como a morfologia, o tamanho e a distribuição ou o arranjo dos cristais e poros, textura e textura dos cristais, etc. (ROSIÈRE et al., 1993a e 1993b; ZAVAGLIA, 1995; ROSIÈRE et al., 1996; HASHIZUME, 1998).

O minério de ferro pode ser caracterizado de diferentes formas, dependendo do tipo de enfoque que será dado na sua caracterização. Podem ser caracterizados, de acordo com a sua mineralogia, microestrutura, textura, distribuição granulométrica, grau de porosidade, tamanho dos cristais, morfologia dos minerais de ferro, anisotropia magnética, orientação cristalográfica preferencial, entre outros.

A presença de diferentes tipos de minerais, texturas e microestruturas, certamente influenciam no comportamento do minério durante o processo de beneficiamento e, conseqüentemente, no processo de aglomeração (XAVIER, 1995; ZAVAGLIA, 1996; MOURÃO et al., 1996; CAPOLARI et al., 1998).

A caracterização dessas amostras indica que, dependendo do critério utilizado para sua classificação, podemos encontrar uma oscilação de determinados minérios de um tipo para outro. A utilização de um parâmetro genérico para sua classificação permite a inclusão de minérios com diferentes origens dentro de um mesmo grupo.

A mineralogia primária do minério de ferro depende basicamente do ambiente de formação. Os processos diagenéticos, deformacionais, metamórficos e/ou intempéricos, aos quais os corpos de minérios foram submetidos, são responsáveis pelas gerações das diferentes fases minerais encontradas nesses corpos de minérios.

A predominância de uma fase mineral sobre as outras está associada à intensidade do processo geológico dominante sofrido pela rocha, responsável pela sua geração. É possível estabelecer uma seqüência de cristalizações de fases minerais de um minério, decorrentes dos vários processos que atuaram sobre o mesmo.

Como colocado anteriormente, o minério de ferro brasileiro apresenta uma mineralogia bastante simplificada, composto basicamente de hematita e quartzo, com pequeno grau de impurezas. Apesar de sua mineralogia simplificada, os minerais de hematita apresentam-se de forma diferenciada, mineral primário a mineral totalmente recristalizado.

ROSIÈRE et al. (1993a) observaram seqüência de cristalização de minerais de ferro no QF, a partir de cristais de magnetita e hematita primárias, apresentadas de forma resumida na TABELA 16.

Magnetita I ↓ Martita I ↓ Hematita Ib ↓	Hematita Ia/b ↓ Hematita II ↓ Hematita III ↓ Hematita IV	Magnetita II ↓ Martita II	Magnetita III ↓ Martita III
Hematita Ia - produto hematita primária Hematita Ib - produto da martitização			

TABELA 16 – Seqüência de gerações de óxidos de ferro do QF (ROSIÈRE et al., 1993a).

Os minerais primários (Magnetita I e Hematita Ia) são de origens sedimentares e responsáveis pelas cristalizações das fases minerais subseqüentes, que são resultado dos processos de deformação e metamorfismo que afetaram o minério.

A presença da martita se dá quando, no início do metamorfismo, ocorre o aumento da fugacidade de oxigênio, gerada pela mobilização de fluidos. Esse mecanismo é responsável pelo desencadeamento do processo de martitização das magnetitas primárias, gerando agregados xenomorfos de martita, que é um pseudomorfo de hematita, ricos em inclusões e poros (ROSIÈRE et al., 1993b).

A presença de maior seqüência de gerações de minerais presentes no minério, indica que o mesmo foi submetido a um maior número de eventos. No entanto, um evento pode ser mais intenso que o anterior, apagando totalmente os eventos anteriores sofridos pelo minério.

O posicionamento do corpo de minério dentro de uma estrutura permite que, nesse corpo, sejam encontradas diferentes seqüências de cristalizações de fases minerais, bem como sua associação diferenciada com o processo de hidratação.

A morfologia dos minerais e o tamanho dos cristais de ferro dependem da temperatura e pressão a que foram submetidos durante a sua cristalização.

Os minerais de ferro estarão melhores cristalizados, quando o ambiente químico estiver em equilíbrio e quanto maior for o tempo para sua cristalização. Os minerais bem cristalizados apresentam suas faces bem definidas, com contornos retos e geralmente pontos tríplexes.

Os minerais com menor grau de cristalização ocorrem quando, durante o processo, o ambiente não estava em equilíbrio e/ou tiveram pouco tempo para sua cristalização. Esses minerais, geralmente, apresentam contorno interdigitado a irregular.

O tamanho dos cristais apresenta uma relação direta com a temperatura, ou seja, quanto maior for a temperatura de cristalização maior será o tamanho dos cristais e menor o grau de hidratação dos minerais de formação do depósito (CAPOLARI et al., 1998).

Os minérios com cristais de minerais de ferro maiores apresentam teores menores de alumina (CAPOLARI et al., 1998), provavelmente, devido ao seu menor grau de hidratação.

A morfologia dos minerais de ferro e o tipo de porosidade presentes nas partículas primárias, são importantes por definirem a rugosidade apresentada pela sua superfície (CAPOLARI et al., 1998). O tipo de superfície da partícula primária influencia na eficiência do minério no processo de micropelotização e na sua reatividade durante o processo de sinterização.

Os corpos de minérios com menor grau de deformação apresentam o bandamento original da rocha preservada. Esse bandamento encontrado é produto da sedimentação, seguida da diagênese com geração predominante de magnetita e hematita primárias, dependendo das condições de oxidação dominante (ROSIÈRE et al., 1993b; XAVIER, 1995; ZAVAGLIA, 1996 e HASHIZUME, 1998). Essas rochas apresentam um desenvolvimento localizado de texturas orientadas em função da baixa magnitude de deformação sofrida (ROSIÈRE et al., 1993b).

O efeito da tectônica é observado pelos corpos de minério em áreas de alta deformação, onde desenvolvem cristais bem orientados de hematita lamelar que definem a foliação. O mesmo ocorre com a temperatura, cujos efeitos são observados na estrutura dos minérios, como na extremidade oriental do QF, onde atingiu metamorfismo da fácies anfibolito comparados com a extremidade ocidental que predomina fácies xisto-verde (FIGURA 12) (ROSIÈRE et al., 1996).

O grau de recristalização está condicionado ao grau de oxidação e ao metamorfismo, associado à deformação, envolvendo processos físicos e químicos (ROSIÈRE et al., 1993b; XAVIER, 1995; ZAVAGLIA, 1996 e HASHIZUME, 1998). Enquanto que a geração de estruturas orientadas, o tipo e o grau de orientação preferencial das fases minerais, está condicionada às características deformacionais e às condições dúcteis a rúpteis (magnitude e tipo do *strain*) às quais, as rochas foram submetidas.

O enriquecimento secundário do minério itabirítico ocorreu associado ao processo de lixiviação dos minerais silicáticos.

A textura do minério varia de acordo com a magnitude de deformação sofrida pela rocha. E, a partir do processo de recristalização, associado à deformação, constatou-se o desenvolvimento de três tipos principais de texturas nos minérios compactos: textura granular; granular a lamelar e lamelar.

Os minérios friáveis ou pulverulentos apresentam texturas semelhantes aos minérios compactos, embora os cristais tendam a perder o arranjo adquirido durante a deformação e metamorfismo, devido à superposição dos fatores intempéricos.

O minério de textura granular é encontrado em regiões de baixa magnitude de deformação e temperatura, apresentando cristais de bordas irregulares de contornos lobados, indicando recristalização incompleta.

O minério de textura lamelar é encontrado em regiões de alta magnitude de deformação e temperatura, formando cristais de bordas regulares e contornos retos, indicando cristais bem cristalizados. A orientação dos cristais de hematita lamelar é formada pela influência de deformação sofrida posteriormente.

Observe-se que a textura granular a lamelar ocorre nas bordas das zonas de cisalhamento ou em áreas fortemente dobradas, enquanto as texturas lamelares são típicas de zonas de cisalhamento (ROSIÈRE et al., 1993b; XAVIER, 1995; ZAVAGLIA, 1996 e HASHIZUME, 1998).

V.2 – Abordagem geometalúrgica

O termo geometalurgia é utilizado para designar a correlação entre a geologia e a metalurgia, integrando o conhecimento geológico do minério de ferro e o comportamento dos diferentes tipos de minério durante o processo metalúrgico (PIMENTA et al., 1999; ROSIÈRE et al., 1996a; 1996b; SOUZA NETO et al., 1999; VIEIRA et al., 1998; 2000).

O estudo geometalúrgico é, portanto, baseado nos atributos mineralógicos, texturais e microestruturais do minério de ferro, adotando-se um controle integrado de qualidade do minério desde a mina até o produto final, o aço. Esse controle pode ser realizado por meio da construção de modelo geológico-tipológico tridimensional estabelecendo as relações espaciais nas jazidas das diversas categorias tipológicas de minérios (COSTA et al., 1998; VERÍSSIMO, 1999), com a função de orientar o planejamento da lavra e controlar a qualidade dos concentrados de minério para os diversos tipos de utilização na siderurgia (SOUZA NETO et al., 1999).

A definição do parâmetro geometalúrgico pode, nos estágios mais avançados, contribuir para definição do parâmetro (s) numérico (s) quantificável (eis) para uso tanto das empresas mineradoras quanto das usinas siderúrgicas. A sua plena realização é dificultada pelas diversas variáveis inerentes tanto no processo de sinterização, quanto na extração sistemática de minério homogêneo. O estudo encontra-se em fase de desenvolvimento e pesquisa, necessitando aprofundamento para compreensão das correlações entre as características intrínsecas do minério de ferro e os parâmetros metalúrgicos.

A integração maior entre a geologia e a metalurgia é uma idéia relativamente recente. Os primeiros trabalhos feitos neste sentido demonstram que, para os diversos tipos de minérios de ferro utilizados em altos-fornos, as propriedades e/ou características metalúrgicas (crepitação, RDI, redutibilidade e parâmetros de amolecimento e fusão) estão intimamente relacionadas com a sua microestrutura e textura (QUADE & TAUGS, 1988; XAVIER, 1994, ZAVAGLIA, 1995, SESHADRI et al., 1996, ROSIÈRE et al., 1996b; CAPOLARI et al., 1998; SOUZA NETO et al., 1999; VIEIRA et al., 2000). Outros estudos da literatura têm discutido a importância da relação entre as características microestruturais e a eficiência nos estágios de aglomeração a frio e a quente nos processos de sinterização (GOLDRING & FRAY, 1989; PEREIRA, 1994; PACHECO et al., 1997).

Alguns estudos foram feitos, no sentido de conhecer melhor, os diferentes tipos de minérios e o seu comportamento metalúrgico, principalmente do minério granulado com o sistema de redução direta (XAVIER, 1994, ZAVAGLIA, 1995) e minérios *sinter feed* com o processo de sinterização (SANTIAGO et al., 2000; JANUZZI, 1999). VIEIRA (1996) correlaciona o fator de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) com os índices de crepitação e RDI de vários tipos de minérios de ferro e observou uma correlação positiva entre as maiores intensidades de ASM e maiores índices de crepitação e RDI.

O estabelecimento de uma metodologia para a caracterização microestrutural de finos de minérios de ferro para sinterização é importante para otimizar o processo de sinterização, como pode ser visto na TABELA 17.

O conhecimento dos parâmetros, que mostram a identidade estrutural desses minérios, facilitará a otimização da produtividade, qualidade e custo, os alicerces do processo de sinterização (VIEIRA et al., 1998).

O tamanho, forma e distribuição dos cristais e poros dos minérios, juntamente com outros fatores, também influenciam a redutibilidade dos sínteres (CAPOLARI et al., 1998).

A presença dos minérios goethíticos na mistura influencia positivamente na parte fundida do sínter, o arranjo da formação das cálcio-ferritas, escória e poros. Os minérios limoníticos influenciam na temperatura de fusão das partículas aderentes (SATO et al., 1986). No entanto, a sua utilização deve ser feita com cautela, visto que os minerais hidratados são os maiores portadores de elementos contaminantes (COELHO et al., 1999; SANTOS & BRANDÃO, 2003),

cujas presenças podem ser prejudiciais ao processo de sinterização e à qualidade do aço.

Parâmetro controlado	Descrição	Influência no sinter	Influência na sinterização
Constituintes mineralógicos das partículas aderentes, intermediárias e nucleantes.	Caracterização mineralógica das fases presentes por meio de microscopia ótica de luz refletida. Para minerais de ganga, difratometria de raios X, etc.	Microestrutura, RDI, porosidade, resistência, redutibilidade, parâmetro de fusão, amolecimento, e gotejamento, viscosidade da escória.	Afeta fortemente a eficiência da etapa de microaglomeração, consumo de energia, produtividade e rendimento da mistura na sinterização, qualidade do sinter.
Tamanho dos cristais das partículas nucleantes, intermediárias e aderentes.	Tamanhos extremos e moda dos valores por meio de microscopia ótica de luz refletida.	Redutibilidade.	Afeta diretamente a eficiência da etapa de microaglomeração e qualidade do sinter.
Textura das partículas nucleantes	Avaliação qualitativa por meio de microscopia ótica.	Resistência, RDI e redutibilidade.	Afeta diretamente a eficiência da etapa de microaglomeração e qualidade do sinter.
Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) das partículas nucleantes.	Avaliação de um índice de ASM, como por exemplo, fator ϵ (varia de 0 a 1,5, para os minérios do Q.F.).	RDI e resistência.	Afeta diretamente a eficiência da etapa de microaglomeração e qualidade do sinter.
Formas e tipos de superfícies das partículas nucleantes, intermediárias e aderentes.	Avaliação da forma, via lupa binocular ou microscopia ótica de luz refletida; às vezes, é útil observação da superfície da partícula via microscopia eletrônica.	RDI, resistência, parâmetros de amolecimento e fusão e redutibilidade.	Afeta diretamente a eficiência da etapa de microaglomeração, produtividade, consumo de energia e qualidade do sinter.
Porosidade total, forma e tamanho dos poros das partículas (nucleante, intermediária e aderente).	Grau de porosidade e tamanho dos poros via microscopia ótica de luz refletida e porosímetro.	Resistência e redutibilidade.	Afeta diretamente a eficiência da etapa de microaglomeração e qualidade do sinter.
Porcentagem de partículas intermediárias e relação nucleantes/aderentes. Parâmetro granulométrico	Avaliação por meio de análise granulométrica.	Microestrutura, resistência, RDI e parâmetros de amolecimento e fusão.	Afeta diretamente a eficiência da etapa de microaglomeração e qualidade do sinter.

TABELA 17 – Principais atributos estruturais que deverão constituir a identidade estrutural de minério de ferro para uso em sinterização (Modificado VIEIRA et al., 1998).

A proporção adequada de minérios hidratados juntamente com os minérios hematíticos compactos contribui para melhorar a redutibilidade do sinter (PACHECO et al., 1997), visto que durante redução em baixas temperaturas a

intensidade de degradação granulométrica dos sínteres é influenciada pelos tipos de constituintes microestruturais presentes (VIEIRA et al., 1998).

A mineralogia e a textura dos minérios são fatores também importantes. A magnetita permanece inalterada durante boa parte do processo, quando presente em quantidades elevadas, mostra não ser bom para o desempenho à fase de redução do processo de sinterização. A presença da hematita por sua vez, ao reduzir-se para magnetita, provoca uma expansão no seu volume, gerando fraturas e, conseqüentemente aumentando a permeabilidade do leito.

A finalidade do estudo geometalúrgico do minério de ferro é prever a qualidade do produto final, a partir da matéria-prima, facilitando assim, a escolha do minério a ser adquirido para compor a mistura adequada ao processo siderúrgico de cada empresa (SOUZA NETO et al., 1999; VIEIRA et al., 2000). Tem também como objetivo conhecer o comportamento metalúrgico das características intrínsecas de cada tipo de minério, onde será atribuída a cada tipologia de minério a sua melhor performance durante o processo siderúrgico.

Observe-se que, geralmente, uma dada característica do minério contribui para a melhoria de um dado parâmetro metalúrgico, mas pode prejudicar um outro parâmetro. Assim, a composição de uma mistura ideal deve apresentar quantidades adequadas de vários tipos de minérios que devem apresentar um produto final de melhor qualidade possível.

Um melhor conhecimento dos diversos tipos de minérios e o seu desempenho metalúrgico auxiliarão tanto os mineradores que poderão ofertar esses minérios conhecidos às usinas siderúrgicas específicas, bem como otimizar a exploração do minério, aumentando a vida útil das minas. Para as usinas siderúrgicas, esse conhecimento as auxiliará, na escolha dos fornecedores que apresentarem os minérios com características que melhor se adaptem ao seu processo.

VI – RESULTADOS DA DESCRIÇÃO DOS MINÉRIOS

Os diferentes tipos de minérios serão descritos de acordo com as suas características externas e internas (TABELA 18). Como características externas, têm-se: a forma; o grau de angulosidade; o tipo de superfície de contorno e o grau de alongação. E, como características internas: a mineralogia; a forma dos minerais e dos poros; a superfície de corte dos minerais; o tipo de contato entre os cristais e os poros.

Por meio da descrição dessas características, pode-se encontrar minérios que apresente características bastante semelhantes, mas são classificados como tipos diferentes. Essa diferenciação depende de qual parâmetro será utilizado para sua classificação. Como será visto nas imagens dos minérios a seguir, apresentam diferentes características que influenciam nos seus comportamentos durante o processo de sinterização.

Utilização de uma classificação mineralógica, por exemplo: tipo minério hematítico; têm-se os minérios GI 0137, GI 0164, GI 0165 e HI 0348, inseridos no mesmo grupo; os minérios GI 0137 e GI 0165 são tipo hematítico granular; o minério GI 0164 é hematítico lamelar; o minério HI 0348 é do tipo hematítico microgranular. Geologicamente, esses minérios sofreram um grau diferenciado de deformação e metamorfismo, pois além de apresentarem minerais de hematita de tipos diferentes, apresentam também cristais de hematitas com

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS							
Minério	Classificação	Mineralogia	Textura	Porosidade	Arredondamento	Superfície de contorno	Elongação
GI 0137	Hematítico	Hr, Hl	Granular	25 a 60%	Ar a Sag	Irregular a reta	1.76
GI 0164	Hematítico	Hl	Lamelar	45 a 65%	Sag a Sar	Irregular	2.27
GI 0165	Hematítico	Hr, Hl	Granular	45 a 65%	Sar a Sag	Irregular	1.96
GI 0166	Hematítico/Magnetítico Hidratado	Mg, Mt, Hr, Hl, Hd Qz	Granular a lamelar	50%	Sar a Sag	Irregular	1.96
GI 0358	Hematítico magnetítico	Mg, Mt, Hr, Hl, Hd	Granular	40%	Ar a Sag	Irregular	1.44
HI 0348	Hematítico	Hm, Hr, Hl, Hd,	Microcristalina a Granular	30%	Ag a Ar	Reta a Irregular	1.77

TABELA 18 – Resumo das principais características de cada tipo de minério estudado.

diferentes tamanhos e arranjos, que podem ter um comportamento diferenciado durante o processo de sinterização.

É interessante notar que, o grau de porosidade da fração *sinter feed* é relativamente alto, ao compara-se com as amostras de mão coletadas nas minas; esse fato pode ser devido ao beneficiamento, à preparação e à classificação dos minérios dentro das próprias minas. Na TABELA 18, têm-se as características principais, apresentadas por cada tipo de minério estudado. Como será visto adiante, as características intrínsecas de cada minério possibilita classificá-los em tipos distintos.

IV.1 – Minério GI 0137

Classificação: Minério Hematítico poroso a compacto

Textura: Granular

Composição Mineralógica: Hematita lamelar, Hematita Lamelar, muito localmente, mineral hidratado e quartzo.

IV.1.1 – DESCRIÇÃO DAS PARTÍCULAS PRIMÁRIAS

As partículas primárias deste minério são equidimensionais a ligeiramente alongadas, com bordas subangulosas a subarredondadas, com superfície de contorno reta a irregular e podem ser divididas em três tipos (baseado no grau de porosidade) (FIGURA 31), que são: Tipo I – Poroso; Tipo II – Porosidade Intermediária; Tipo III - Compacto. Os três tipos apresentam as seguintes características:

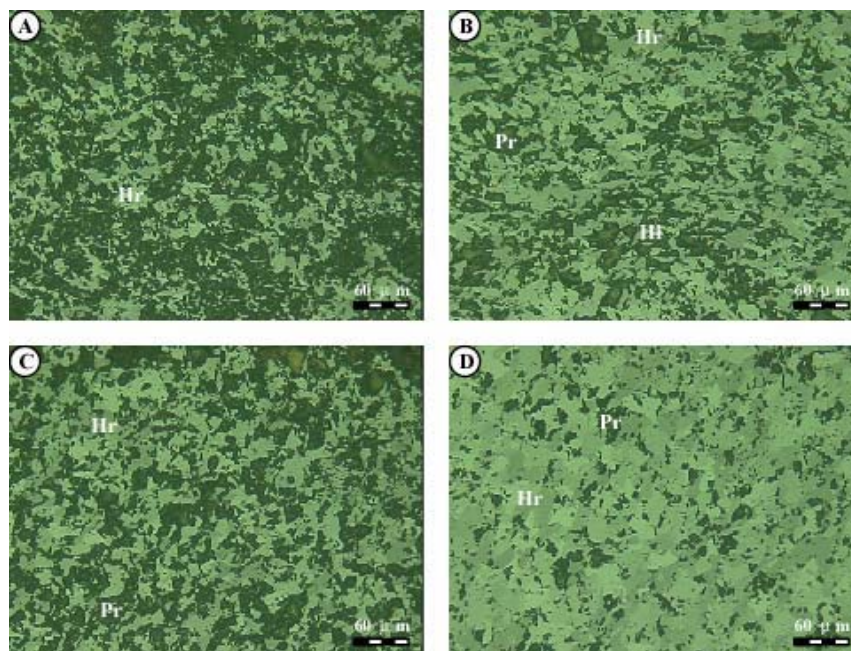


FIGURA 31 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0137. (A) Minério tipo I – composto basicamente de Hr, com textura granular; (B) Minério tipo II – composto de Hr e Hl, os cristais de Hl alinhados, sugerindo uma foliação, com textura granular a lamelar; (C) Minério tipo II – composto basicamente de Hr e Pr, com textura granular; e (D) Minério tipo III – composto basicamente de Hr e Pr, com textura granular. (Luz polarizada).

Tipo I – são partículas primárias bastante porosas com textura granular. Essas partículas são compostas, basicamente, de pequenos agregados de cristais de hematita granular (Hr), dispersos dentro da matriz porosa (poros e cristais isolados de Hr e/ou hematita lamelar - Hl). Podem apresentar-se: bandados, quando ocorre a intercalação de bandas mais e menos porosas; foliados, quando

os cristais de HI se apresentam orientados. As partículas primárias, desse tipo, tendem a ser mais arredondada com superfícies de contorno irregulares.

Tipo II – são partículas primárias que apresentam porções mais compactas gerando: bandamento, quando intercaladas com as porções mais porosas ou textura granular, quando dispersas dentro das porções mais porosas e vice-versa. Os cristais de HI podem ser encontrados dispersos dentro dos agregados de Hr ou nos poros (Pr); quando orientados geram a foliação. As partículas primárias desse tipo podem ser subarredondadas a subangulosas, com superfícies de contorno irregulares a retas.

Tipo III – são partículas primárias compactas com presença de Pr isolados, dispersos dentro da matriz hematítica, apresentando textura granular. São compostos basicamente de Hr e Pr, com presença de HI subordinada, podendo estar dispersos ou orientados, gerando a foliação que pode estar anastomosada, quando contornam os agregados de Hr. As partículas primárias desse tipo são subangulosas com superfície de contorno predominantemente reto.

Pode-se resumir as características principais de cada tipo de partícula primária na seguinte TABELA 19:

Características Principais	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Grau de porosidade	> 60%	25% < e > 60%	< 25%
Grau de arredondamento	Arredondado a Subarredondado	Subarredondado a Subanguloso	Subanguloso
Superfície de contorno	Irregular	Irregular a reto	Reto
Textura	Granular	Granular	Granular

TABELA 19 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do minério GI 0137.

VI.1.2 – DESCRIÇÃO MINERALÓGICA

Hematita granular (Hr) – São cristais anédricos a subeuédricos, granulares a pouco alongados de superfície lisa, com contorno irregular. Esses cristais apresentam uma granulação média, com tamanho médio de 30 μm ; podem ser encontrados na forma de agregados ou como cristais isolados dispersos entre os Pr. Os cristais granulares podem ser observados acompanhando as fraturas; também podem formar um bandamento anastomosado com os cristais de HI alinhados, gerando a foliação.

Hematita lamelar (HI) – São cristais subeuédricos, alongados a granulares de superfície lisa, com contorno reto a irregular e de granulação geralmente mais fina que a Hr, com tamanho médio de 10 μm ou menos; podem ser encontrados dispersos na matriz porosa ou alinhados, cortando ou contornando os agregados granulares de Hr.

Mineral hidratado (Mh) – Ocorre muito, localmente, associado aos Pr.

Quartzo (Qz) – Ocorre de forma localizada e está, geralmente, associado aos Pr.

Poros (Pr) – são anédricos, granulares com contorno irregular e tamanho médio de 30 μm . Nas porções porosas, esses Pr são formados por dois ou mais Pr agrupados; nas porções compactas, acompanham o tamanho dos cristais de Hr.

VI.1.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS SUBFRAÇÕES DE *SINTER FEED*

O minério GI 0137 é dividido nas subfrações nucleantes GI 0137-1, GI 0137-2 e GI 0137-3 (FIGURA 32); nas subfrações aderentes GI 0137-6 e GI 0137-7 (FIGURA 33).

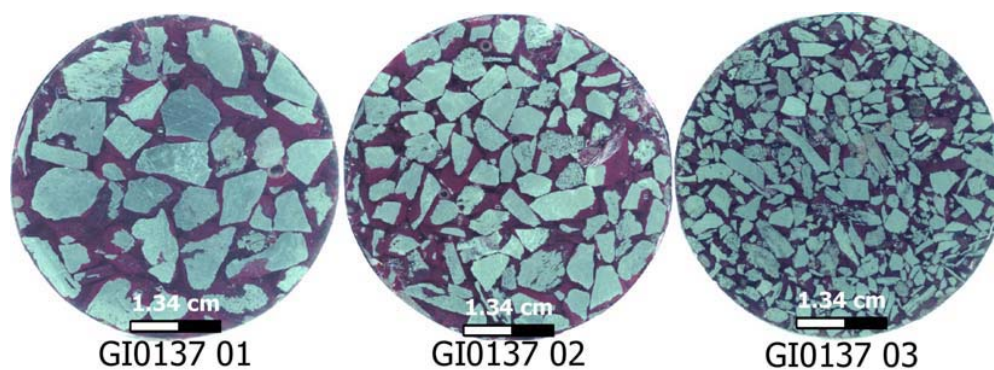


FIGURA 32 – Seções polidas das subfrações nucleantes do *sinter feed* do minério GI 0137.

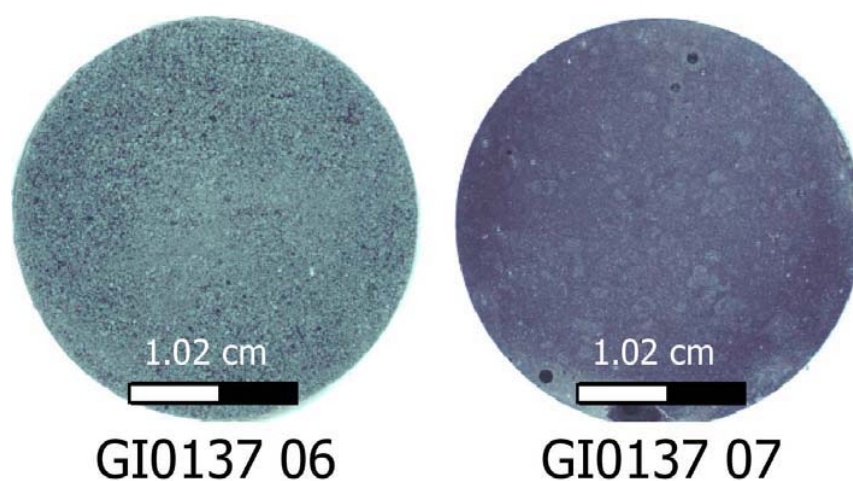


FIGURA 33 – Seções polidas das subfrações aderentes do *sinter feed* do minério GI 0137.

As subfrações nucleantes são partículas primárias compostas de agregados de cristais de Hr com HI subordinada e/ou cristais isolados, dispersos na matriz porosa e Pr. As partículas primárias dessas subfrações são granulares a pouco alongadas, com grau de alongação médio de 1,8 (FIGURA 34). Nessa figura observa-se a relação entre o eixo maior e eixo menor das partículas primárias medidos.

Na TABELA 20, pode ser observado que ocorre a predominância das partículas primárias tipo II em todas as subfrações, sendo seguida pelo tipo I, por último, pelo tipo III.

As subfrações aderentes deste minério são compostas de pequenos agregados de cristais e cristais isolados de Hr e HI. Esses pequenos agregados são granulares, como pode ser observado pelo grau de alongação.

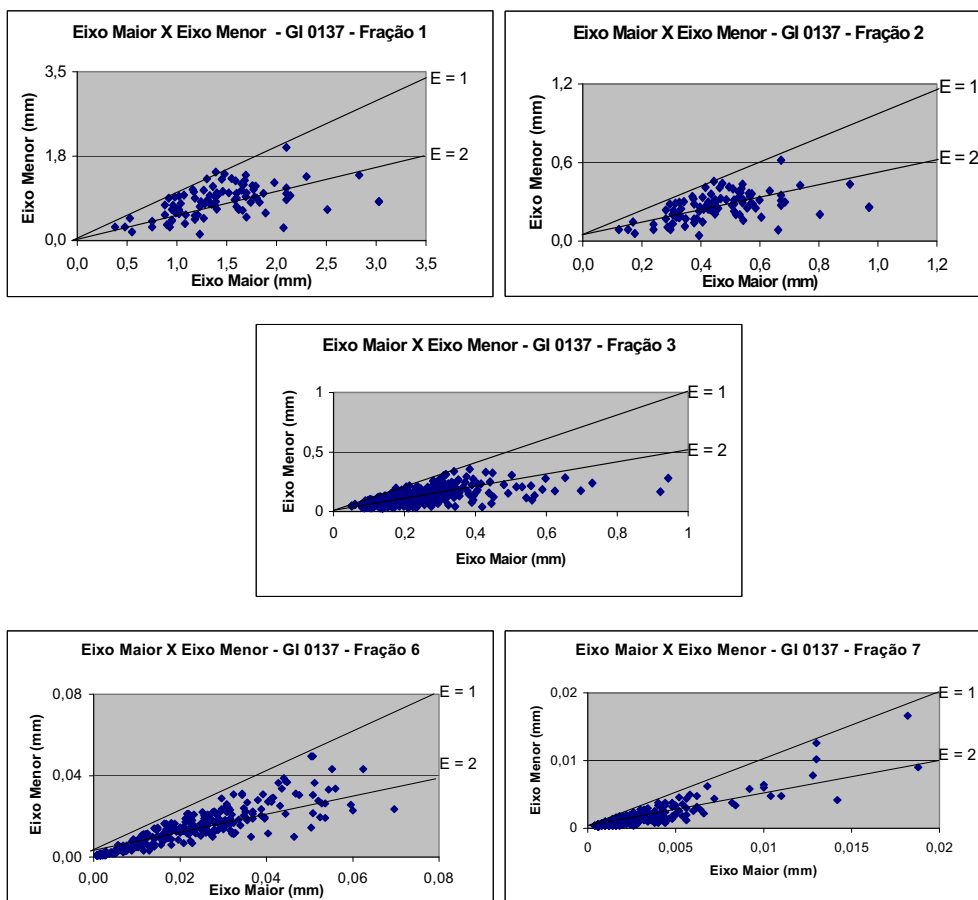


FIGURA 34 – Razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).

Tipo Nucleante	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Tipo I (%)	Tipo II (%)	Tipo III (%)
GI0137 – 1	6,90	4,40	1,83	35,89	43,58	20,51
GI0137 – 2	4,57	2,49	1,83	34,04	52,12	13,82
GI0137– 3	2,33	1,24	1,87	37,07	48,78	12,19
Média			1,84	35,67	48,78	12,19

TABELA 20 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0137.

O grau de alongação é menor na subfração 6, provavelmente devido a uma maior contribuição de agregados de cristais, sendo que na subfração 7 é maior, devido à maior contribuição de cristais isolados (TABELA 21 e FIGURA 34).

Tipo Aderente	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Cristal (%)	Agregado (%)
GI 0137 – 6	0,031	0,019	1,68	20,33	79,00
GI 0137 – 7	0,0015	0,0008	1,76	90,67	9,33
Média			1,72	55,50	44,16

TABELA 21 – Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0137.

VI.1.4 – DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA

Este minério é composto basicamente de Hr com presença de HI subordinada. A HI ocorre dispersa entre os agregados de Hr e de forma muito localizada; pode estar alinhada, gerando a foliação no minério. Localmente, podem ser encontrados também Qz e Mh. A distribuição mineralógica nas subfrações está representada na TABELA 22 e no GRÁFICO 01.

Subfrações	Hr	HI	Pr	Total
137-1	39,51	12,50	47,96	99,97
137-2	31,34	6,90	61,72	99,96
137-3	37,56	5,63	56,73	99,92
137-6	67,29	2,31	30,39	99,99
137-7	82,11	10,75	7,13	99,99

TABELA 22 – Distribuição mineralógica das subfrações do *sinter feed* do minério GI 0137.

O GRÁFICO 01 mostra a distribuição mineralógica nas subfrações nucleantes e aderentes do minério GI 0137. Esse minério, em todas subfrações, indica o predomínio dos cristais de Hr, com HI subordinada, com alto grau de porosidade nas subfrações nucleantes, cuja média é de 55%. Com relação às

subfrações aderentes, há uma diminuição na quantidade de Pr, principalmente na subfração 7 (como pode ser visto na TABELA 21), devido ao aumento na quantidade de cristais isolados de Hr e HI, que não apresentam porosidades internas e os pequenos agregados dessas subfrações demonstram que os Pr presentes são pequenos e em quantidades menores.

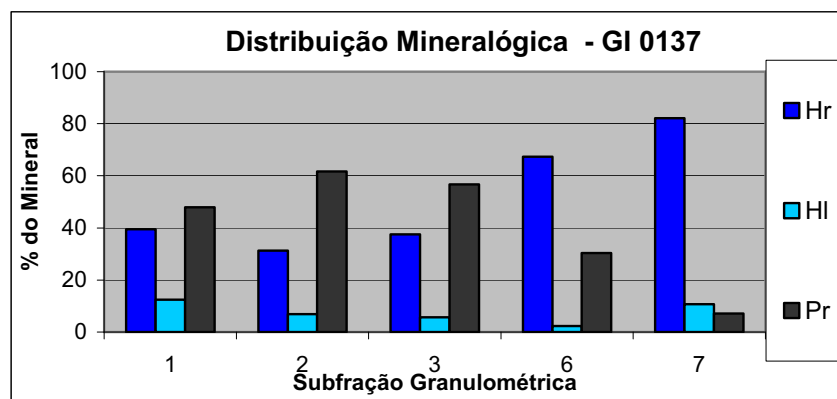


GRÁFICO 01 – Distribuição mineralógica das subfrações do *sinter feed* do minério GI 0137. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente).

VI.2 – Minério GI 0164

Classificação: Minério Hematítico poroso

Textura: Lamelar

Composição Mineralógica: Hematita granular, Hematita Lamelar e magnetita subordinada.

VI.2.1 – DESCRIÇÃO DAS PARTÍCULAS PRIMÁRIAS

As partículas primárias desse minério são arredondadas a subarredondadas e alongadas a subalongadas, com superfície de contorno irregular (bastante rugoso). As partículas primárias são compostas basicamente de cristais de hematita e Pr, sendo que há ocorrência de partículas primárias de martita (Mt) associada com magnetita (Mg). Os cristais de hematita podem apresentar-se de forma lamelar (especularita) e granular; pelas suas relações texturais, indicam terem sido formados durante o mesmo processo geológico.

Esse minério pode ser separado em dois tipos principais (FIGURA 35): Tipo I – minério hematítico compacto ou poroso e Tipo II – minério martítico/magnetítico compacto. O minério tipo I pode ser dividido (de acordo com a textura apresentada), em Tipo IA; Tipo IB; e Tipo IC, conforme descrito abaixo.

Tipo IA – Granular: são partículas primárias compostas basicamente de minerais de Hr e Hl e Pr. Há o predomínio de cristais Hr, sendo encontrados cristais de Hl dispersos a levemente orientados, indicando uma foliação muito suave.

Tipo IB – Intermediário: são partículas primárias compostas tanto de Hr quanto de Hl em iguais proporções. Os cristais de Hl encontram-se alinhados, gerando a foliação; geralmente, contornando ou sendo cortados pelos agregados de cristais de Hr, formando-se assim uma foliação anastomosada.

Tipo IC – Lamelar: são partículas primárias compostas, basicamente, por minerais de Hl e Pr, com Hr subordinada. Os cristais de Hl encontram-se fortemente orientados, gerando a foliação do minério, em algumas partículas

primárias é possível identificar duas direções de foliação, sendo a segunda de menor penetração. Localmente, ocorre a presença de cristais de Hr, dispersos dentro da foliação.

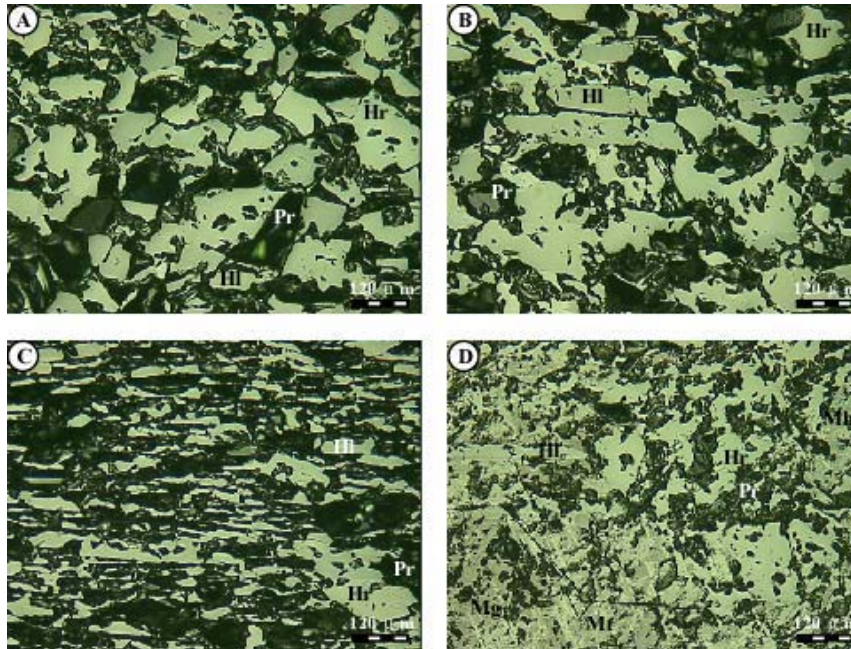


FIGURA 35 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0164. (A) Minério tipo IA – composto basicamente de Hr, com textura granular; (B) Minério tipo IB – composto de Hr e HI, os cristais de HI alinhados, sugerindo uma foliação, com textura intermediária (granular a lamelar); (C) Minério tipo IC – composto basicamente de HI apresentando uma forte orientação que define a foliação principal, sendo cortada por uma segunda foliação de menor penetração, com textura lamelar; e (D) Minério tipo II – composto de Mg martitzada com Hr e HI subordinado, com textura granular. (Luz polarizada).

Tipo II – minério magnético/martítico compacto: são fragmentos compostos basicamente de Mg; está sob intenso processo de martitização; em alguns fragmentos é possível encontrar porções hematíticas nas bordas, que podem evidenciar ser um fragmento de veio rico em Mg que cortou o minério hematítico.

Pode-se resumir as características principais de cada tipo de partícula primária na seguinte TABELA 23:

Características Principais	Tipo I			Tipo II
	Tipo IA	Tipo IB	Tipo IC	
Grau de porosidade	45 a 65 %	45 a 65 %	45 a 65 %	< 25%
Grau de arredondamento	Arredondado a subarredondado	Arredondado a subarredondado	Arredondado a subarredondado	Subanguloso
Superfície de contorno	Irregular	Irregular	Irregular	Reto
Textura	Granular	Intermediária	Lamelar	Granular

TABELA 23 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do minério GI 0164.

VI.2.2 – DESCRIÇÃO MINERALÓGICA

Magnetita (Mg) – Encontrada como resquício dentro da matriz martítica. Os seus cristais são anédricos, granulares de superfície lisa e contorno irregular. Encontrada apenas nas partículas primárias magnetíticas.

Martita (Mt) – É produto do processo de martitização da Mg, encontrado na forma anédrica a subeuédrica, granular de superfície porosa e contorno irregular a reto. O processo de martitização é intenso; a maior parte os cristais de Mg encontram-se totalmente martitizados, apresentando uma matriz martítica com relictos de cristais de Mg dispersos. Ocorre apenas nas partículas primárias magnetíticas.

Hematita granular (Hr)– São cristais subeuédricos, granulares de superfície interna lisa e contorno pouco irregular, com tamanho médio de 50 a 100 μm . Apresentam um alto grau de cristalização, observado pelos contornos dos cristais bem definidos. Encontrados dispersos dentro da foliação, ora cortando-a ou acompanhando-a; essa associação geralmente apresenta uma foliação anastomosada.

Hematita lamelar (Hl)– São cristais subeuédricos, alongados de superfície interna lisa e contorno reto; o tamanho médio varia de 80-200 μm de comprimento para 35-90 μm de largura. Apresentam um alto grau de recristalização, evidenciado pelo contato bem definido entre os cristais. Os cristais desse mineral podem estar pouco

a fortemente orientados, definindo a foliação das partículas primárias. Em algumas partículas primárias, é possível identificar duas direções de alinhamento.

Quartzo (Qz) – Pode ocorrer disperso dentro dos Pr, mas de forma muito localizada.

Poros (Pr) – Nas partículas primárias nucleantes, os poros são subeuédricos, ligeiramente alongados de contorno irregular a reto, tamanho médio de 200 μm .

VI.2.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS SUBFRAÇÕES DO *SINTER FEED*

O minério GI 0164 apresenta as seguintes subfrações: Nucleantes GI 0164-1, GI 0164-2 (FIGURA 36) e GI 0164-3; Aderentes GI 0164-6 e GI 0164-7 (FIGURA 37). As características principais dessas subfrações do minério serão descritas como vemos a seguir.

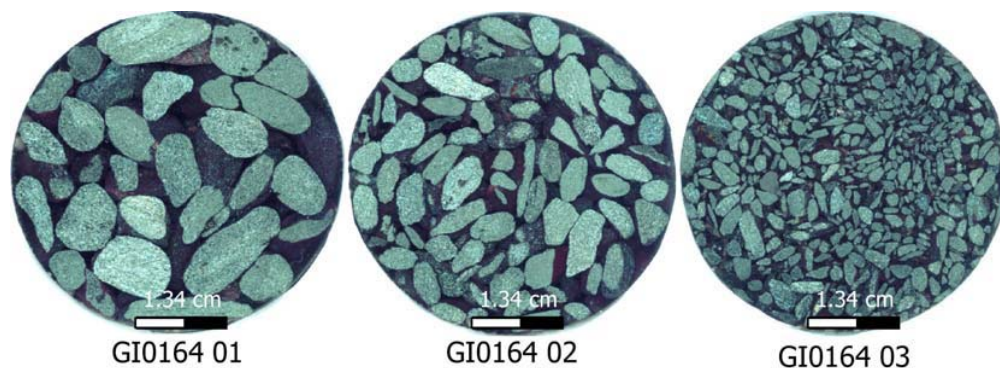


FIGURA 36 – Seções polidas das subfrações nucleantes do *sinter feed* do minério GI 0164.

As subfrações nucleantes são partículas primárias compostas de agregados de cristais de HI fortemente orientados com Hr dispersos e Pr. Essas

subfrações apresentam partículas primárias alongadas a pouco alongadas, cujo grau de alongação médio é de 2,05 (FIGURA 38). Na FIGURA 38, pode-se observar a relação entre o eixo maior e menor das partículas primárias medidas.

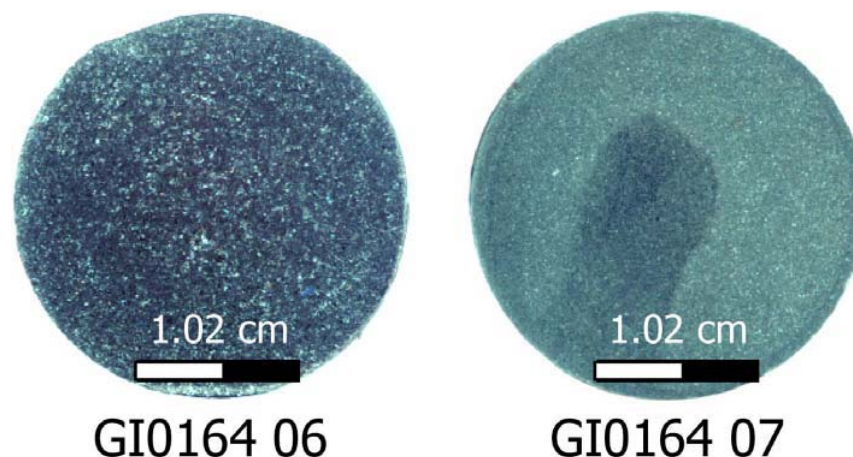


FIGURA 37 – Seções polidas subfrações aderentes do *sinter feed* do minério GI 0164.

O minério Tipo I é predominante, sendo o minério Tipo IC de maior proporção, seguido minério Tipo IB e o minério Tipo IA. Com esta distribuição, esse minério apresenta o predomínio da textura lamelar, visto pela presença de minerais de HI fortemente orientadas. A orientação bem definida indica um maior grau de deformação. Como pode ser observado pelos dados da TABELA 24.

Tipo Nucleante	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Tipo I (%)			Tipo II (%)
				Tipo IA	Tipo IB	Tipo IC	
GI0164 – 01	9.10	5.10	1.92	13.33	36.67	50	-
GI0164 – 02	5.44	2.75	2.20	13.75	40	38.75	7.5
GI0164 – 03	1.92	0.96	2.02	16.81	40.45	37.72	3.18
Média			2.05	14.63	39.04	42.16	3.56

TABELA 24 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0164.

As subfrações aderentes do minério GI 0164 apresentam um grau de alongação maior que as subfrações nucleantes, provavelmente, devido à quantidade de cristais isolados de HI, encontrados nestas subfrações, conforme

pode ser observada pela FIGURA 38 e na TABELA 25, que mostra a relação entre o eixo maior e menor de cada partícula primária ou cristal medido.

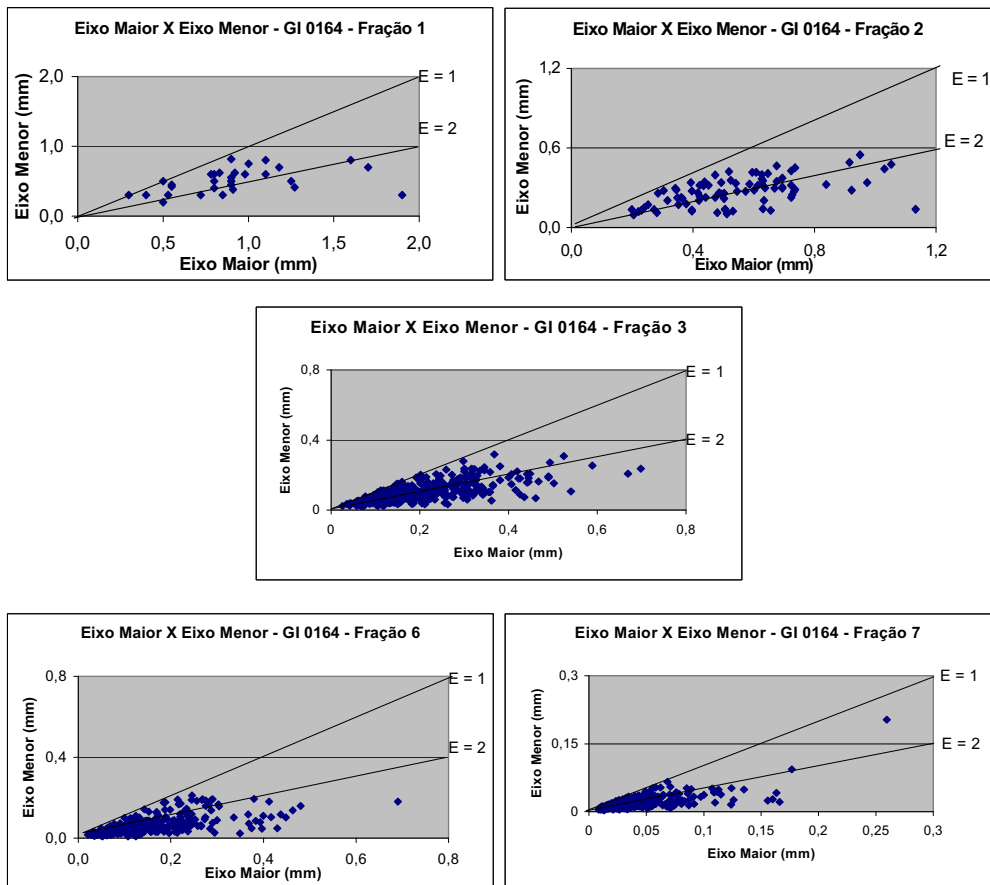


FIGURA 38 – Razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).

Tipo Aderente	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Cristal (%)	Agregado (%)
GI0164 – 06	0.154	0.064	2.87	84.67	15.33
GI0164 – 07	0.0148	0.0069	2.13	98.33	1.67
Média			2.5	91.50	8.50

TABELA 25 – Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0164.

Os agregados dessas subfrações são compostos, geralmente, por uma média de 4 cristais de HI. A maior quantidade de cristais isolados nessas subfrações, deve-se provavelmente, à facilidade de deslocamento dos cristais deste minério.

VI.2.4 – DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA

O minério GI 0164 é composto basicamente de HI e Pr, nele são encontrados algumas partículas primárias magnetíticas/martíticas. Os cristais de hematita são de origem metamórfica, cristalizados durante o processo de metamorfismo e deformação. Esses processos são responsáveis pela geração de cristais grandes, tamanho médio de 100 μ m, bastante orientados (FIGURA 35B e 35C).

As partículas primárias das subfrações nucleantes desse minério apresentam maior proporção de cristais de HI, que se deslocam facilmente, talvez por isso a grande quantidade de Pr alongados. As subfrações aderentes são formadas basicamente por cristais isolados, com pouca contribuição de cristais agregados, como pode ser visto na TABELA 26 e GRÁFICO 02.

Subfrações	Mg	Mt	Hr	HI	Mh	Qz	Pr	Total
164-1	0,00	0,00	4,50	32,07	0,00	0,00	63,42	99,99
164-2	1,33	1,93	8,15	28,10	0,00	0,00	60,40	99,99
164-3	0,29	3,11	3,75	29,57	0,00	0,00	63,27	99,99
164-6	0,00	0,00	6,00	83,42	0,00	0,00	10,51	99,93
164-7	0,00	0,00	9,00	82,05	0,00	0,00	8,95	100,00

TABELA 26 – Distribuição Mineralógica das subfrações do *sinter feed* do minério GI 0164.

No GRÁFICO 02, pode-se observar que a distribuição mineralógica média desse minério. Nas subfrações nucleantes, há o predomínio da HI/Hr, com Mt e Mg subordinada e os Pr encontram-se acima de 50%, indicando ser um minério bastante poroso. Nas subfrações aderentes, há uma diminuição de

agregados de cristais da subfração 6 para subfração 7 e um conseqüente aumento na quantidade de cristais isolados, cuja média fica em torno de 8.5% para agregados de cristais e 91.5% de cristais isolados (TABELA 25). A porosidade das subfrações nucleantes está associada à porosidade interna dos cristais e aos pequenos agregados presentes.

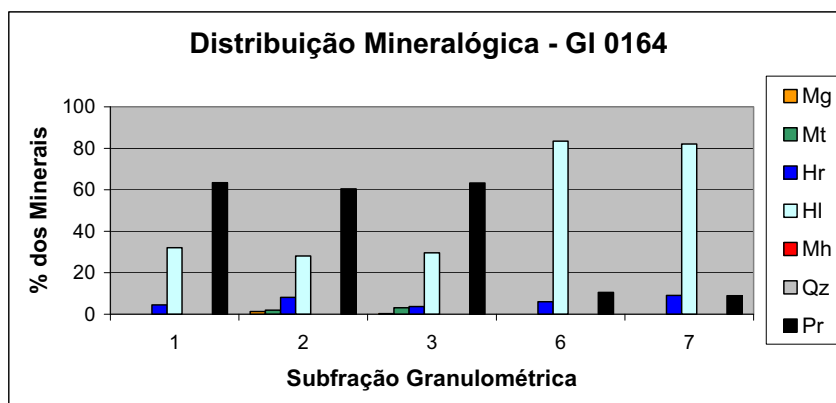


GRÁFICO 02 – Distribuição Mineralógica das subfrações do *sinter feed* do minério GI 0164. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)

VI.3 – Minério GI 0165

Classificação: Minério Hematítico poroso a compacto

Textura: Granular

Composição Mineralógica: Hematita granular, localmente, mineral hidratado, com algumas partículas primárias contendo cristais de magnetita e martita.

VI.3.1 – DESCRIÇÃO DAS PARTÍCULAS PRIMÁRIAS

As partículas primárias do minério GI 0165 são alongadas a equidimensionais, subangulosas a subarredondadas de contorno irregular (rugoso). Essas partículas primárias são compostas basicamente de cristais de hematita e Pr, a Mt/Mg; podem ser encontradas nas partículas primárias magnetíticas. Os cristais de hematitas apresentam forma lamelar (especularita) e granular, mas ambas foram originadas durante o mesmo evento metamórfico. Em algumas partículas primárias, pode-se observar um bandamento gerado pela diferença no grau de porosidade. As partículas primárias desse minério diferenciam-se do minério GI 0164, pelo menor grau de orientação dos cristais de Hl e uma maior quantidade de cristais de Hr.

As partículas primárias do minério GI 0165 podem ser separadas em dois tipos principais (FIGURA 39): Tipo I – minério hematítico compacto ou poroso, Tipo II – minério martítico/magnetítico compacto. O minério tipo I pode ser dividido de acordo com a textura apresentada em Tipo IA; Tipo IB; Tipo IC, semelhante ao minério GI 0164.

Tipo IA – Granular: são partículas primárias compostas basicamente de minerais de Hr com cristais de Hl subordinadas e Pr. Há o predomínio de cristais Hr. Os cristais de Hl são encontrados dispersos entre os cristais granulares de hematita, com pouca ou sem nenhuma orientação, indicando uma foliação muito incipiente quando alinhados.

Tipo IB – Intermediário: são partículas primárias compostas tanto de Hr quanto de Hl e Pr. Os cristais de Hl encontram-se alinhados, gerando a foliação,

geralmente contornando ou sendo cortados pelos cristais de Hr, formando-se assim uma foliação anastomosada.

Tipo IC – Lamelar: são partículas primárias compostas basicamente por minerais de HI e Pr, com presença da Hr subordinada. Os cristais de HI encontram-se fortemente orientados, gerando a foliação do minério. Muito localmente, pode-se observar uma segunda direção de foliação de menor penetração; é menos aparente que o minério GI 0164.

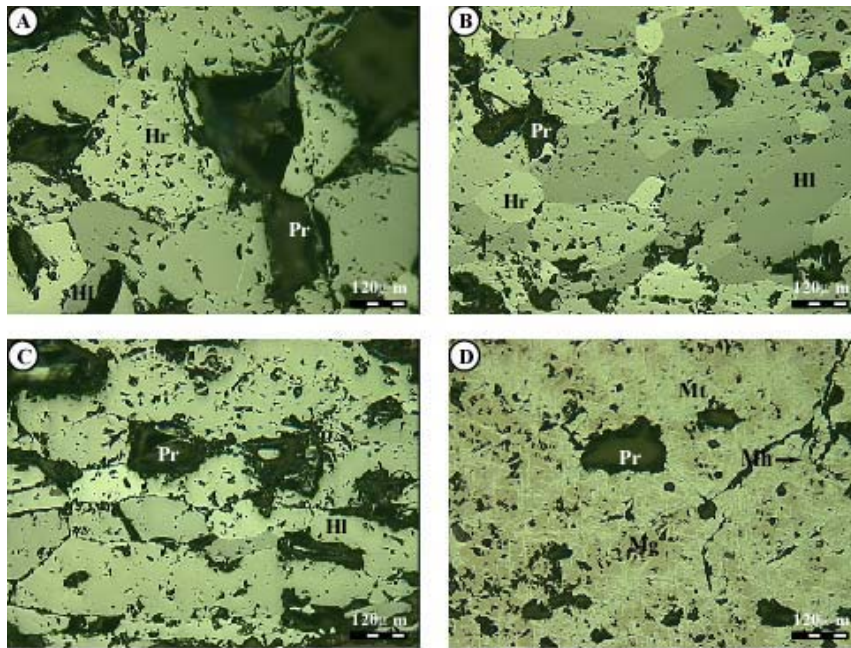


FIGURA 39 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0165. (A) Minério tipo IA – composto basicamente de Hr, com textura granular; (B) Minério tipo IB – composto de Hr e cristais de HI levemente alinhados, sugerindo uma foliação, com textura intermediária (granular a lamelar); (C) Minério tipo IC – composto basicamente de HI, apresentando uma orientação bem definida, gerando a foliação, com textura lamelar; e (D) Minério tipo II – composto de Mg martitizada com Hr e HI subordinado, com textura granular. (Luz polarizada).

Tipo II - Minério magnetítico/martítico compacto: são partículas primárias compostas basicamente de Mg, que estão sob intenso processo de martitização; em algumas partículas primárias observam-se porções hematíticas nas bordas, evidenciando ser uma partícula primária de veio rico em Mg que cortou o minério hematítico.

Pode-se resumir as características principais de cada tipo de partícula primária na seguinte TABELA 27:

Características Principais	Tipo I			Tipo II
	Tipo IA	Tipo IB	Tipo IC	
Grau de porosidade	45 a 65 %	45 a 65 %	45 a 65 %	< 25%
Grau arredondamento de	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado	Subanguloso
Superfície contorno de	Irregular	Irregular	Irregular	Reto
Textura	Granular	Intermediária	Lamelar	Granular

TABELA 27 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do minério GI 0165.

VI.3.2 – DESCRIÇÃO MINERALÓGICA

Magnetita (Mg) – São cristais anédricos, granulares de superfície lisa, contornos retos. Encontram-se sob um intenso processo de martitização, presente nas partículas primárias magnetíticas/martíticas compactas.

Martita (Mt) – É produto do processo de martitização da Mg. São cristais subeuédricos, granulares de superfície porosa e contornos irregulares, presentes nas partículas primárias magnetíticas/martíticas.

Hematita granular (Hr) – São cristais anédricos, granulares a ligeiramente alongados de superfície lisa e contorno reto a irregular, com tamanho médio 100 µm. Apresentam médio grau de recristalização, visto pelo contato pouco irregular entre os cristais. Esses cristais encontram-se distribuídos aleatoriamente entre os cristais de Hl. Em algumas partículas primárias, observa-se uma intercalação de bandas dessas hematitas, gerando um bandamento.

Hematita lamelar (Hl) – São cristais subeuédricos, alongados de superfície lisa, contorno irregular e com tamanho médio 200 μm de comprimento por 120 μm de largura. Esses cristais apresentam-se pouco orientados.

Mineral hidratado (Mh) – A sua presença é rara nas partículas primárias hematíticas, sendo encontrada, mais facilmente, nas partículas primárias magnetíticas como produto dos cristais de Mg e Mt. Apresenta-se como uma massa amorfa.

Quartzo (Qz) – Encontrado de forma muito localizada e dispersa nos Pr das partículas primárias.

Poros (Pr) – São anédricos, arredondados, granulares a subalongados, de contorno irregular; seu tamanho médio varia de 100 μm a maiores.

VI.3.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS SUBFRAÇÕES DO *SINTER FEED*

O minério GI 0165 apresenta as seguintes subfrações: Nucleantes GI 0165-1, GI 0165-2 e GI 0165-3 (FIGURA 40); Aderentes GI 0165-6 e GI 0165-7 (FIGURA 41).

As subfrações nucleantes são partículas primárias compostas de agregados de cristais de Hr com Hl fortemente orientadas, cortando os agregados de Hr e Pr. As partículas primárias dessas subfrações apresentam um grau de alongação médio de 1,91, que é um pouco menor que o do minério GI 0164 (FIGURA 42). Na FIGURA 42, pode-se observar os gráficos com a razão entre o eixo maior e eixo menor de suas partículas primárias medidas; na TABELA 28 tem-se as medidas dos eixos e a distribuição dos tipos de partículas primárias nessa subfração.

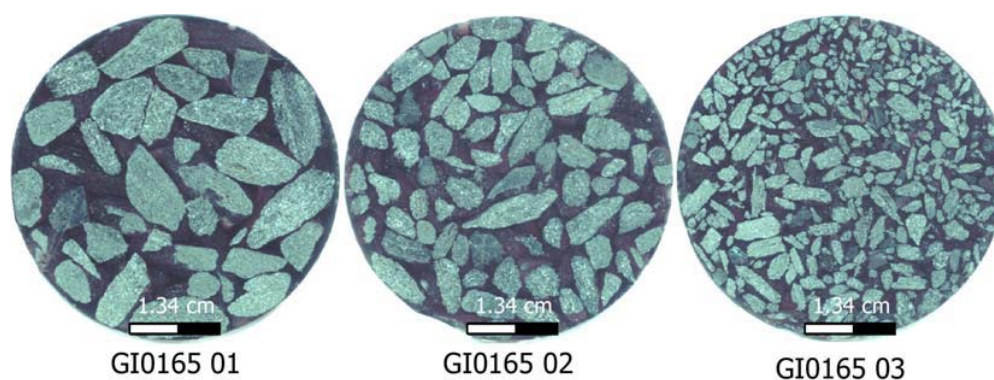


FIGURA 40 – Seções polidas das subfrações nucleantes do *sinter feed* do minério GI 0165.

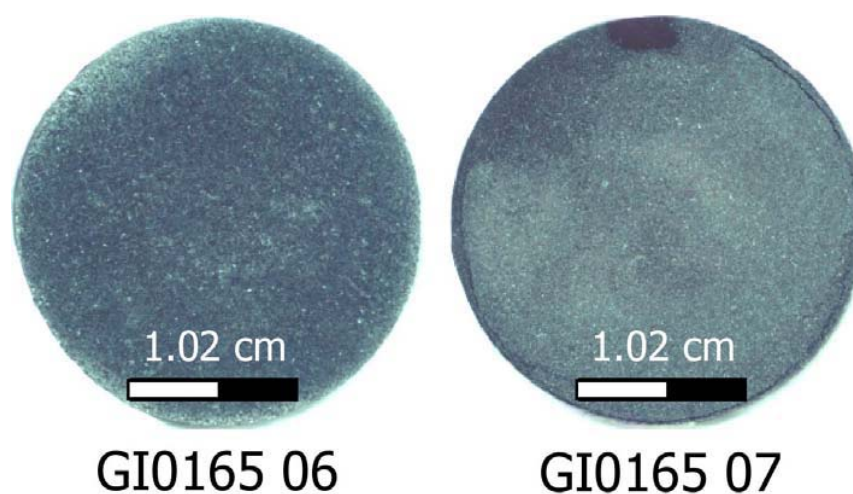


FIGURA 41 – Seções polidas subfrações aderentes do *sinter feed* do minério GI 0165.

Tipo Nucleante	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Tipo I (%)			Tipo II (%)
				Tipo IA	Tipo IB	Tipo IC	
GI0165 – 01	8.50	4.40	2.0	25.71	45.71	25.71	2.85
GI0165 – 02	5.24	2.88	1.82	19.67	42.62	32.78	4.92
GI0165 – 03	2.27	1.18	1.92	13.54	45.83	29.17	9.37
Média			1.91	19.64	44.72	29.22	5.71

TABELA 28 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0165.

A partícula primária Tipo I é predominante em relação à partícula primária Tipo II. Nas subfrações mais grosseiras, a partícula primária Tipo IB encontra-se em maior proporção, seguido das partículas primárias Tipo IC e Tipo IA, respectivamente, e o minério Tipo II. No entanto, há o predomínio da textura

granular, com cristais de Hr bem cristalizados. Observa-se também, um aumento na quantidade do minério tipo II nas subfrações menores.

As subfrações aderentes do minério GI 0165 apresentam um grau de alongação maior que as subfrações nucleantes, provavelmente, devido à quantidade de cristais isolados de HI, encontrados nestas subfrações. Os agregados dessas subfrações são compostos, geralmente, por uma média de 4 cristais de Hr e/ou HI. A maior contribuição dos cristais isolados dessas subfrações, provavelmente, deve-se à facilidade de deslocamento dos cristais do minério, conforme pode ser visto na TABELA 29 abaixo. A FIGURA 42 mostra a razão entre o eixo maior e eixo menor das partículas primárias aderentes medidas.

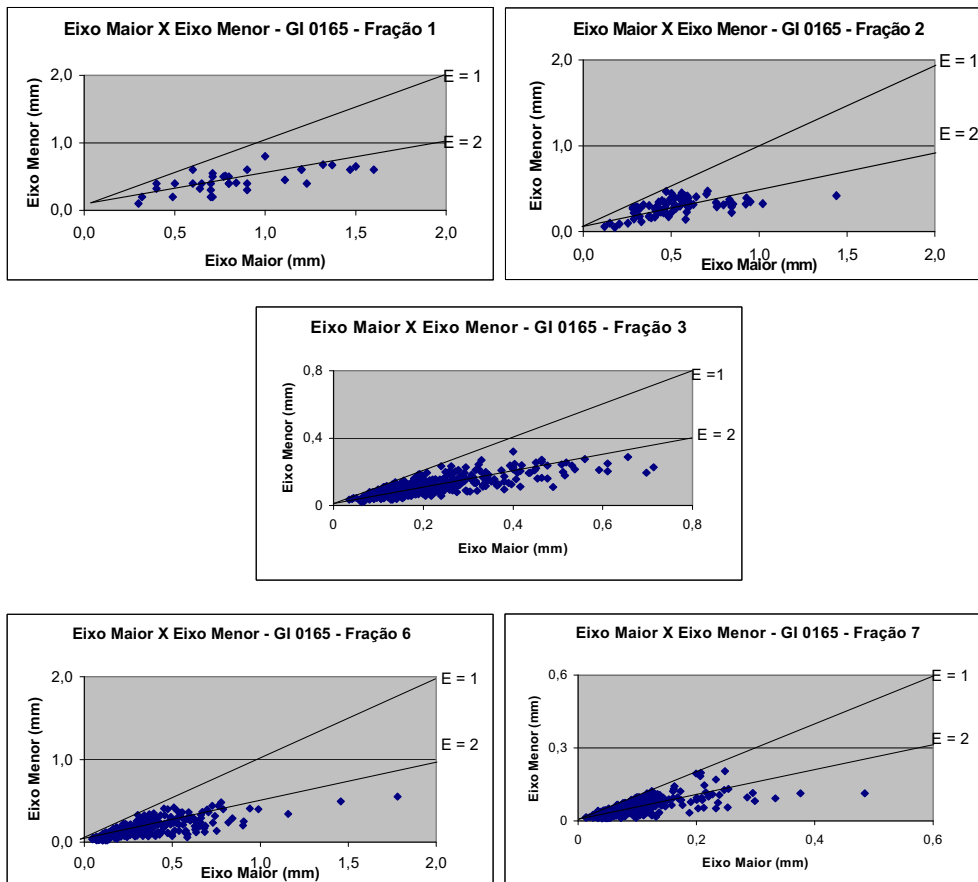


FIGURA 42 – Razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).

Tipo Aderente	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Cristal (%)	Agregado (%)
GI0165 – 06	0.359	0.165	2.18	90.33	9.67
GI0165 – 07	0.096	0.052	1.83	100.00	0.00
Média			2.01	95.16	4.84

TABELA 29 – Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0165.

VI.3.4 – DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA

Este minério é composto basicamente de hematita granular e Pr com HI subordinado, são encontradas algumas partículas primárias magnetíticas/martíticas. Os cristais de Hr são grandes, com tamanhos médios de 100 μ m, subeuédricos de superfície lisa e contorno reto a irregular, pode-se apresentar de forma granular a ligeiramente alongada. Os cristais de HI encontram-se fortemente orientados e se apresentam em finas bandas contornando os agregados de cristais de Hr, gerando assim uma foliação anastomosada. Essa foliação e o tamanho dos cristais de Hr indicam que este minério sofreu um alto grau de deformação durante o metamorfismo.

As partículas primárias das subfrações nucleantes deste minério apresentam os cristais na forma de plaquetas de hematita, que se deslocam facilmente, talvez por isso a grande quantidade de Pr apresentados. As subfrações aderentes apresentam praticamente cristais isolados, com pouca contribuição de cristais agregados, como pode ser visto na TABELA 30 e GRÁFICO 03.

Pelo gráfico, pode ser observada a distribuição mineralógica média do minério GI 065. Nas subfrações nucleantes, há o predomínio da Hr, com HI, Mt e Mg subordinada e os Pr encontram-se em torno de 50%, indicando ser um minério bastante poroso, nas subfrações nucleantes. Este minério apresenta uma maior

contribuição de Mt/Mg que o minério GI 0164. Com relação as subfrações aderentes, os agregados de cristais apresentam-se apenas na subfração 6, mesmo assim em quantidade muito pequena; na subfração 7, há somente a presença de cristais isolados. A média das subfrações aderentes fica em torno de 4,84% para agregados de cristais e 95% de cristais isolados, conforme pode ser observado na TABELA 29.

Subfração	Mg	Mt	Hr	HI.	Mh	Qz	Pr	Total
165-1	0,00	0,00	51	5,13	0,00	0,00	43,86	99,99
165-2	1,51	5,57	37,33	5,57	0,00	0,00	50,01	99,99
165-3	2,30	3,41	37,10	3,41	0,00	0,00	53,77	99,99
165-6	0,00	0,00	70,17	22,48	0,00	0,00	7,32	100,00
165-7	0,00	1,72	51,15	37,22	0,00	0,00	9,90	100,00

TABELA 30 – Distribuição mineralógica das subfrações do *sinter feed* do minério GI 0165.

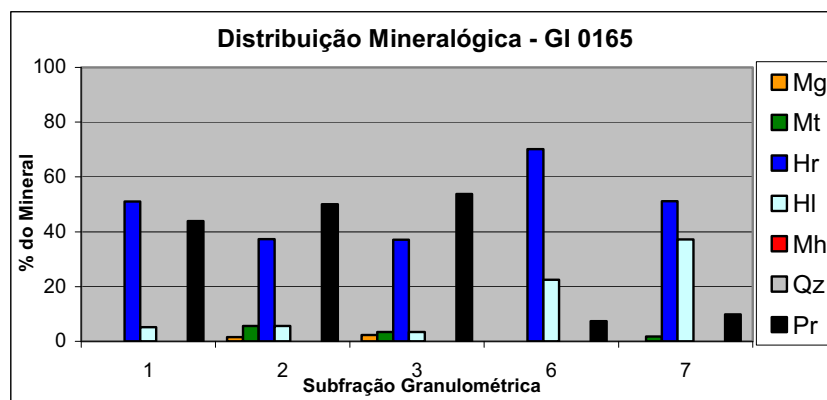


GRÁFICO 03 – Distribuição Mineralógica das subfrações do *sinter feed* do minério GI 0165. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)

VI.4 – Minério GI 0166

Classificação: Minério Hematítico/Magnetítico poroso a compacto

Textura: granular

Composição Mineralógica: Magnetita, Martita, Hematita lamelar, Hematita Lamelar, Mineral Hidratado e Quartzo.

VI.4.1 – DESCRIÇÃO DAS PARTÍCULAS PRIMÁRIAS

As partículas primárias apresentam formas alongadas a granulares, tendo o predomínio das partículas primárias alongadas. As partículas primárias alongadas apresentam bordas angulosas resultando em formato retangular. Internamente eles apresentam um bandamento, dado pela intercalação de porções menos porosas de coloração cinza e porções porosas de coloração avermelhada. As partículas primárias granulares são arredondadas sem bandamento definido. As partículas primárias deste minério tendem a se quebrar de forma tabular (FIGURA 43).

Este minério pode ser dividido em três tipos principais: Tipo I – Minério Martítico; Tipo II – Minério Martítico e Hematítico; Tipo III – Minério Hematítico. Esses três tipos de minério podem ser compactos ou porosos; podem apresentar diferentes graus de hidratação, de inexistente a uma matriz hidratada,

envolvendo os outros cristais como a matriz. As intensidades dos tons avermelhados das partículas primárias evidenciam o grau diferenciado de hidratação do minério.

Tipo I – é composto basicamente de Mt formada a partir dos cristais de Mg martitizados. A Mg pode ser encontrada apenas como resquício dentro da matriz martítica, podendo ou não estar sofrendo processo de hidratação associado. Esse tipo de partícula primária é encontrado como agregados martíticos granulares porosos com Pr dispersos associados, com diferentes graus de hidratação, de ausente a altamente hidratados. As partículas primárias desse tipo são geralmente pouco porosas.

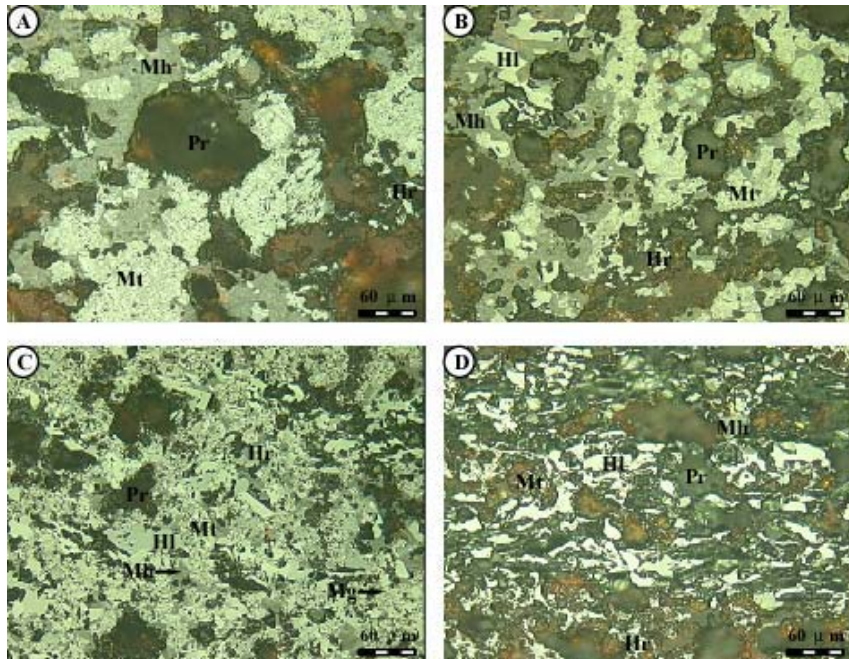


FIGURA 43 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0166. (A) Minério tipo I – composto basicamente de Mt, Hd, Pr e resquícios de Mg; com textura granular; (B) Minério tipo II – Idem ao anterior, mas com presença sutil de Hr, Hl e resquícios de Mg; com textura granular; (C) Minério tipo II – com Mt, Mh, Hr, Hl, Mg e Pr, com maior contribuição de hematita; textura granular a lamelar; e (D) Minério tipo III – composto de Hl e Pr com Hr, Mt e Mh subordinados, com textura lamelar. (Luz polarizada).

Tipo II – é composto por bandas de agregados de Mt, associadas às bandas de cristais de Hl e Hr, formando partículas primárias bandadas. A Mg ocorre de forma reliquiar. Os cristais de Hl encontram-se geralmente fortemente orientados, definindo uma foliação ao minério. Este tipo apresenta-se geralmente

poroso, pode ser encontrado Mh associado, principalmente, aos agregados martíticos.

Tipo III – é composto, basicamente, de cristais de HI, fortemente orientados, definindo a foliação do minério, são encontrados pequenos agregados de Mt, Mh e Qz dispersos nos Pr. Este tipo é o mais poroso dos três.

Pode-se resumir as características principais de cada tipo de partícula primária na seguinte TABELA 31:

Características dominantes	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Grau de porosidade	Intermediária	Intermediária	Intermediária
Grau de arredondamento	Subarredondado	Subanguloso a Subarredondado	Subanguloso
Superfície de contorno	Irregular	Irregular	Irregular a reto
Textura	Granular	Granular e lamelar	Lamelar

TABELA 31 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do minério GI 0166.

VI.4.2 – DESCRIÇÃO MINERALÓGICA

Magnetita (Mg) – Os cristais de Mg estão sofrendo intensos processos de martitização e hidratação, que iniciam da borda para o centro e pelos seus planos cristalográficos. A Mg pode ser encontrada na forma de relictos dispersos dentro dos cristais de Mt como cristais anédricos a subeuédricos, granulares a alongados com superfície lisa, contorno irregular e tamanho médio de 20 a 30 μm .

Martita (Mt) – É produto da Mg. São cristais anédricos, granulares de superfície porosa e contorno irregular, com tamanho médio de 60 μm . Localmente, observa-se que os cristais de Mts estão se alterando para goethita (processo de hidratação).

Hematita lamelar (Hl) – São cristais subeuédricos, alongados de superfície lisa e contorno e contato reto, com tamanho médio variando entre 30 e 125 μm . Esses cristais são encontrados dispersos, como pequenos agregados ou em bandas finas, apresentando-se fortemente orientados, desenvolvendo uma foliação no minério; quando contornam os agregados de Mt, geram uma foliação anastomosada.

Mineral hidratado (Mh) – É encontrado como produto de alteração da Mt e Hl e como cristais isolados. Os cristais isolados são anédricos, granulares de superfície lisa e contorno irregular, com tamanho médio de 30 μm , ocorrendo dispersos nas partículas primárias e de forma muito localizada. Podem ser encontradas como partículas primárias, dispersas nas diferentes subfrações do *sinter feed*.

Quartzo (Qz) – São cristais anédricos, granulares de superfície lisa e contorno irregular, com tamanho médio 60 μm . Esse mineral é encontrado disperso dentro das partículas primárias, geralmente, associado aos minerais hidratados e Pr. Podem ser encontrados como partículas primárias, dispersas nas diferentes subfrações do *sinter feed*.

Poros (Pr) – São anédricos, granulares a alongados, de contorno irregular, com grande variação no seu tamanho médio de 50 a 400 μm , presente de forma aleatória em todas as partículas primárias. Geralmente, os Pr alongados são encontrados dispostos paralelos à foliação, gerada pela Hl orientada.

VI.4.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS SUBFRAÇÕES DO *SINTER FEED*

O minério GI 0166 apresenta as seguintes subfrações: Nucleantes GI 0166-1, GI 0166-2 e GI 0165-3 (FIGURA 44); Aderentes: GI 0166-6 e GI 0166-7 (FIGURA 45).

As subfrações nucleantes são partículas primárias compostas de agregados de cristais de Mt/Mg, HI, Mh e Pr com Qz subordinado. As partículas primárias destas subfrações apresentam um grau de alongação médio de 2,18 (FIGURA 46), indicando que as partículas primárias desse minério nas subfrações nucleantes são alongadas. Na FIGURA 46, apresenta-se a razão entre eixo maior e eixo menor das partículas primárias medidos nestas subfrações. Pode ser observado também na TABELA 32 abaixo.

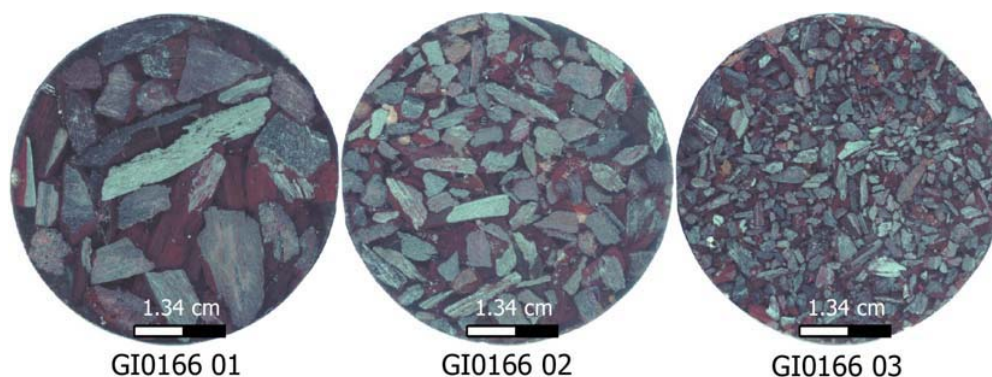


FIGURA 44 – Seções polidas das subfrações nucleantes do *sinter feed* do minério GI 0166.

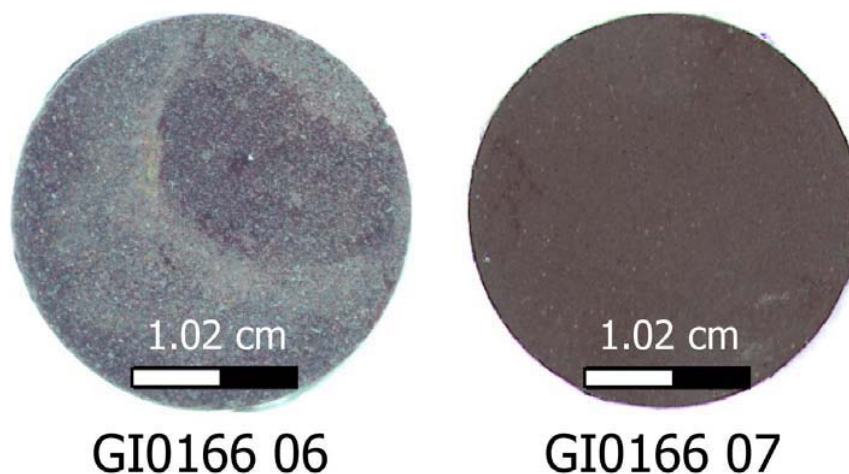


FIGURA 45 – Seções polidas subfrações aderentes do *sinter feed* do minério GI 0166.

Tipo Nucleante	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Tipo I (%)	Tipo II (%)	Tipo III (%)
GI0166 – 01	9.70	4.60	2.37	37.93	44.83	13.79
GI0166 – 02	4.67	2.37	2.27	40.0	47.06	10.59
GI0166 – 03	1.79	0.96	1.90	27.32	53.61	14.43
Média			2.18	35.08	48.50	12.94

TABELA 32 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0166.

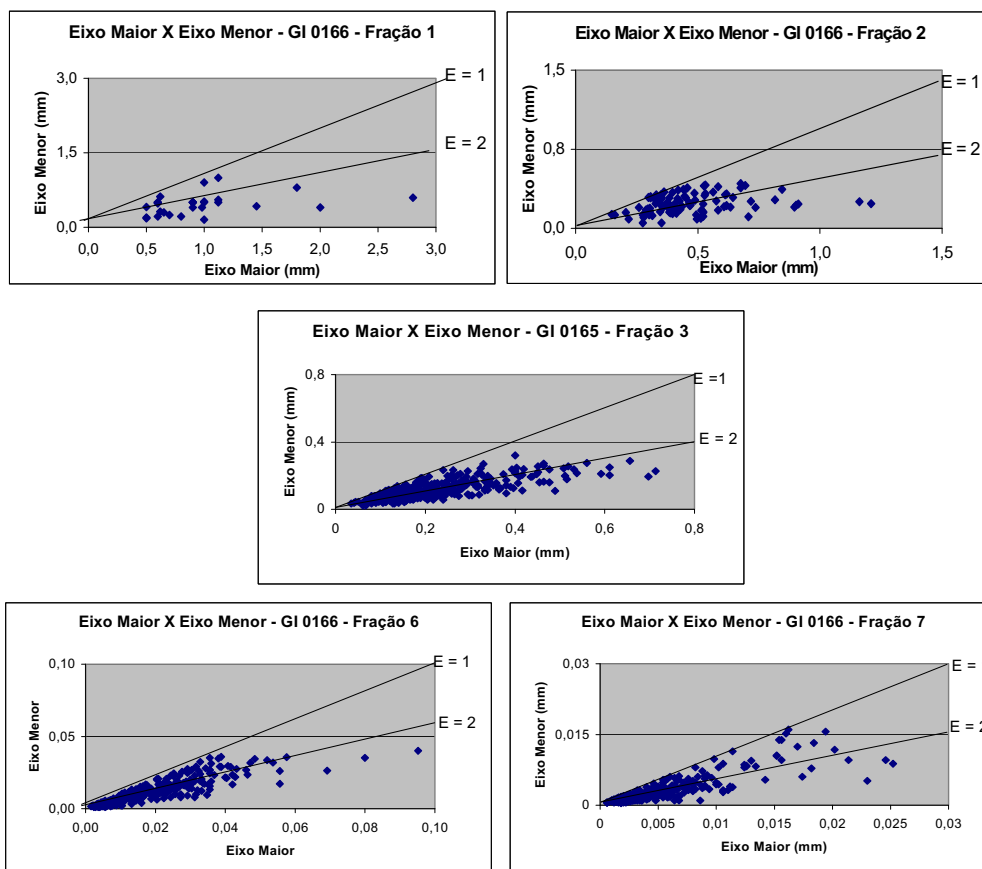


FIGURA 46– Razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).

O minério Tipo II é predominante em relação aos outros tipos minério, sendo seguido pelo minério Tipo I, e pelo Tipo III. Esta distribuição evidencia que as partículas primárias desse minério apresentam uma maior quantidade de minério com textura intermediária a granular.

As subfrações aderentes do minério GI 0166 apresentam grau de alongação menor que os das subfrações nucleantes; este fato deve-se ao tipo de

partículas primárias presentes e aos cristais isolados (TABELA 33). As partículas primárias dessa subfração são formadas por pequenos agregados compostos de Mg martitizada, Mt, Hr, Hl, Qz e minerais hidratados. O mineral hidratado ocorre como partícula primária granular ou como matriz, agregando os demais minerais. Nessa subfração, ainda, ocorre a presença de cristais granulares isolados de Qz. A FIGURA 46 apresenta a razão entre o eixo maior e eixo menor dos agregados e cristais isolados.

Tipo Aderente	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Cristal (%)	Agregado (%)
GI0166 – 06	0.0275	0.0171	1.83	46.33	53.67
GI0166 – 07	0.0028	0.0016	1.70	70.33	29.67
Média			1.76	58.33	41.67

TABELA 33 – Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0166.

VI.4.4 – DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA

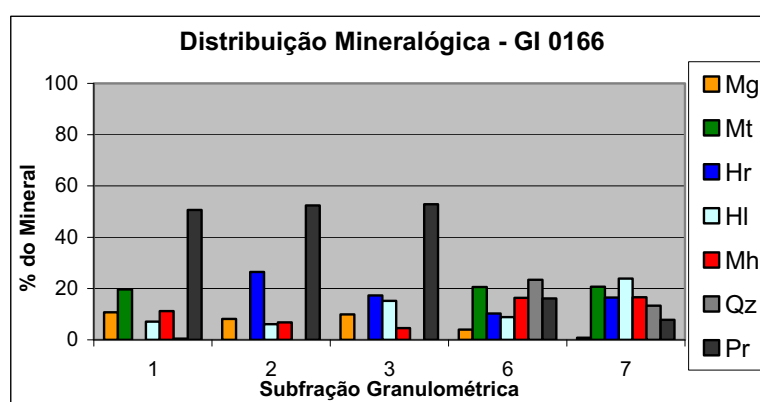
Este minério é composto de partículas primárias martíticas e hematíticas com diferentes graus de hidratação e porosidade intermediária. Os cristais de Mt formam agregados granulares e podem ou não ter a presença de resquícios de Mg, bem como podem estar ou não se alterando para Mh. Os cristais de Hl são alongados, subeuédricos de superfície lisa e contorno reto a irregular e encontram-se fortemente orientados, definindo uma forte foliação ao minério.

A distribuição dos minerais poderá ser melhor observada na TABELA 34 e GRÁFICO 04. Esse minério apresenta maior diversidade mineralógica, como pode ser visto pela presença do Qz, bem como pelas formas diferenciadas de ocorrências do Mh e Mt.

Subfração	Mg	Mt	Hr	HI	Mh	Qz	Pr	Total
166 – 1	10,79	19,68	0,00	7,19	11,21	0,42	50,68	99,98
166 – 2	8,22	0,00	26,54	6,06	6,78	0,00	52,38	99,97
166 – 3	9,92	0,00	17,32	15,21	4,63	0,00	52,91	99,98
166 – 6	4,04	20,64	10,31	8,96	16,42	23,40	16,22	99,98
166 – 7	0,84	20,77	16,51	23,92	16,70	13,37	7,85	99,97

TABELA 34 – Distribuição Mineralógica das subfrações do *sinter feed* do minério GI 0166.

Pelo gráfico, observa-se a distribuição mineralógica média desse minério. Nas subfrações nucleantes há um predomínio de agregados de Mt, seguido de Mg, com uma diminuição de Mh nas subfrações mais finas, enquanto que a porosidade apresenta-se constante, em torno de 50% indicando ser um minério relativamente poroso.

GRÁFICO 04 – Distribuição Mineralógica das Subfrações do *sinter feed* do minério GI 0166. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)

Nas subfrações aderentes, a subfração 6 apresenta uma distribuição relativamente homogênea entre Mt, cristais isolados e agregados de HI, Mh e Qz, bem como agregados de Mt e Mh; Mt e Hr; HI e Mh, esses últimos em menor quantidade. Na subfração 7, há uma maior contribuição de cristais isolados de HI, seguido de Mt, Mh e os outros.

VI.5 – Minério GI 0358

Classificação: Minério Hematítico poroso a compacto

Textura: Granular

Composição Mineralógica: Magnetita, Martita, Hematita Granular, Hematita Lamelar, localmente, mineral hidratado.

VI.5.1 – DESCRIÇÃO DAS PARTÍCULAS PRIMÁRIAS

As partículas primárias apresentam diferentes graus de porosidade, as quais podem ser separadas em partículas primárias porosas e compactas com a mesma mineralogia. As partículas primárias porosas são granulares e arredondadas de contorno irregular, já as partículas primárias mais compactas são ligeiramente subangulosas e alongadas. Algumas partículas primárias apresentam porções compactas dispersas numa matriz mais porosa e vice-versa, no entanto sem definir um bandamento, mas uma textura granular.

O minério GI 0358 pode ser dividido em três tipos principais (FIGURA 47): Tipo I – Compacto; Tipo II – Semicompacto e Tipo III – Poroso.

Todos os três tipos apresentam a mesma composição mineralógica, sendo compostos basicamente de Mt, gerada pelo processo de martitização da Mg, Hr e Hl. Os cristais de Mt encontram-se na forma de agregados com cristais de Hr dispersos, localmente, são encontrados cristais de Hl dispersos ou ligeiramente alinhados na matriz martítica.

Tipo I – Compacto – é formado por partículas primárias compactas alongadas de contorno reto a irregular, borda subangulosa a sub-arredondada com superfície lisa.

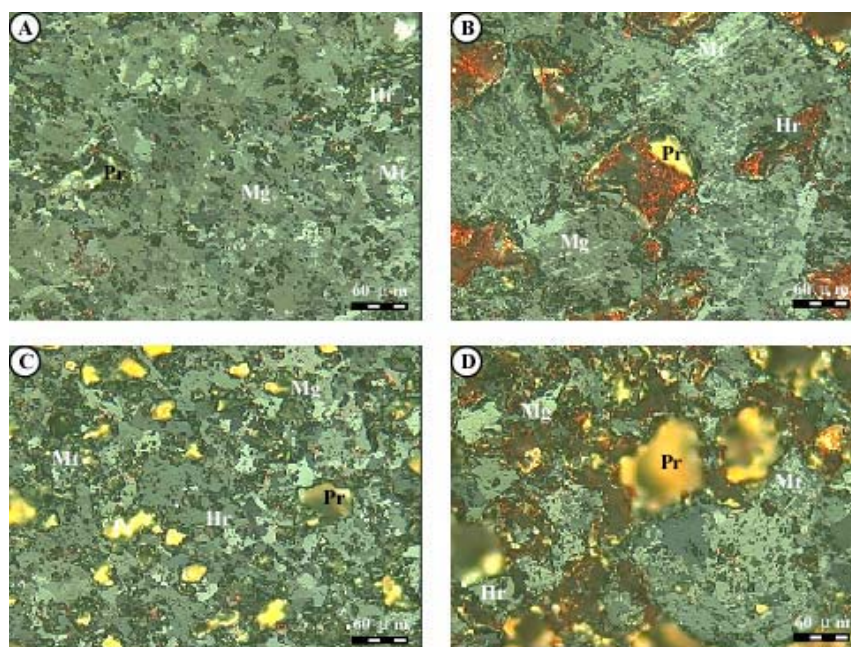


FIGURA 47 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério GI 0358. (A) Minério tipo I, composto de Mg martitzada e Hr e Pr dispersos; (B) Minério tipo II, composto de Mg martitzada formando estruturas tipo treliça com Hr subordinado e Pr; (C) Minério tipo II, com maior quantidade de Hl; e (D) Minério tipo III, composto de Mg, na forma de resquícios dentro da Mt e Hr disperso dentro da matriz porosa. (Luz polarizada).

Tipo II – Intermediário – é formado por partículas primárias porosas com porções compactas dispersas ou vice-versa; essas partículas primárias são equidimensionais a alongadas de contorno irregular, borda subarredondada a arredondada e superfície porosa.

Tipo III – Poroso – é formado por partículas primárias porosas, equidimensionais de contorno irregular, borda arredondada e superfície porosa a extremamente porosa.

Pode-se resumir as características principais de cada tipo de partícula primária na seguinte TABELA 35:

Características Principais	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Grau de porosidade	Intermediária	Intermediária	Intermediária
Grau de arredondamento	Subanguloso a Subarredondado	Subarredondado a Arredondado	Arredondado
Superfície de contorno	Irregular a Reto	Irregular	Irregular
Textura	Granular	Granular	Granular

TABELA 35 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do minério GI 0358.

VI.5.2 – DESCRIÇÃO MINERALÓGICA

Magnetita (Mg) – ocorre como resquícios dentro dos cristais de Mt e Hl. Podem apresentar-se como: (i) cristais anédricos de formatos amebóides e granulares com, superfície lisa e contorno irregular, quando envolvidos pelos cristais de Mt e Hl; (ii) ou como cristais subeuédricos a euédricos, granulares a alongados com superfície lisa e contorno reto, quando encontrados entre os planos cristalográficos martitizados. O tamanho médio dos cristais de Mg é em torno de 20 μ m.

Martita (Mt) – É o produto do processo de martitização da Mg, cujos cristais são anédricos, granulares de superfície porosa a pouco porosa e contorno irregular e com tamanho médio de 50 μ m.

Hematita Granular (Hr)– São cristais anédricos e granulares, de superfície pouco porosa e contorno irregular, com tamanho médio de 20 μm . O contato interdigitado e irregular entre os cristais evidenciam um baixo a médio grau de recristalização.

Hematita Lamelar (Hl) – São cristais bem recristalizados, subeuédricos, geralmente, alongados com superfície lisa e contorno reto, tamanho médio de 15 μm . Ocorre de forma dispersa ou agregada, no contato entre a Hl e os Pr. Localmente são encontrados alinhados, gerando uma foliação incipiente.

Mineral Hidratado (Mh) – Ocorre muito localmente, principalmente nas porções mais porosas, como produto das Mt e Mg, esta última em menor proporção.

Quartzo (Qz) – Ocorre de forma dispersa, geralmente associado aos Pr.

Poros (Pr) – São anédricos, granulares de contorno irregular, encontrados dispersos na matriz martítica, com tamanho médio de 60 μm . Quanto mais porosa a partícula primária, maior o tamanho dos Pr, devido à associação de dois ou mais Pr.

VI.5.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS SUBFRAÇÕES DO *SINTER FEED*

O minério GI 0358 apresenta as seguintes subfrações: Nucleantes GI 0358-1, GI 0358-2 e GI 0358-3 (FIGURA 48); Aderentes GI 0358-6 e GI 0358-7 (FIGURA 49).

As subfrações nucleantes são partículas primárias compostas de agregados de cristais de Mt com resquícios de Mg com Hr e Hl subordinada e Pr. As partículas primárias dessas subfrações são granulares a pouco alongadas, com grau de alongação médio de 1,53, indicando que as partículas primárias desse minério nas subfrações nucleantes são granulares, conforme pode ser observada na FIGURA 50.

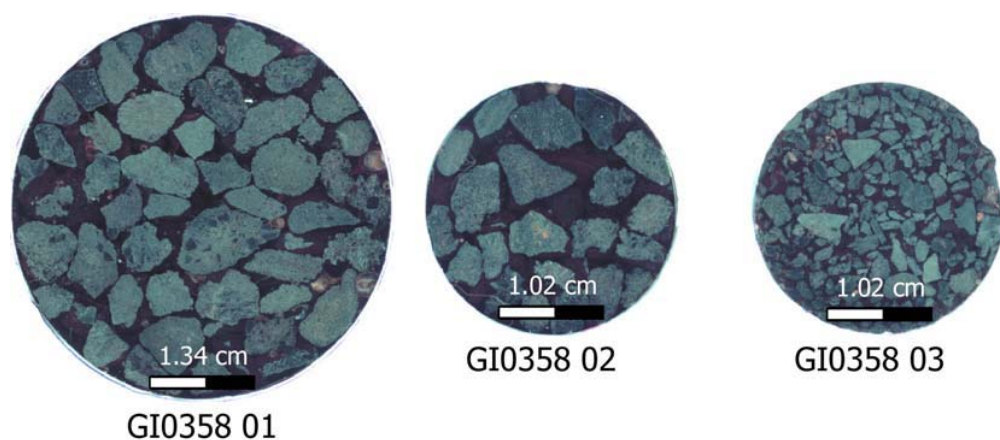


FIGURA 48 – Seções polidas das subfrações nucleantes do *sinter feed* do minério GI 0358.

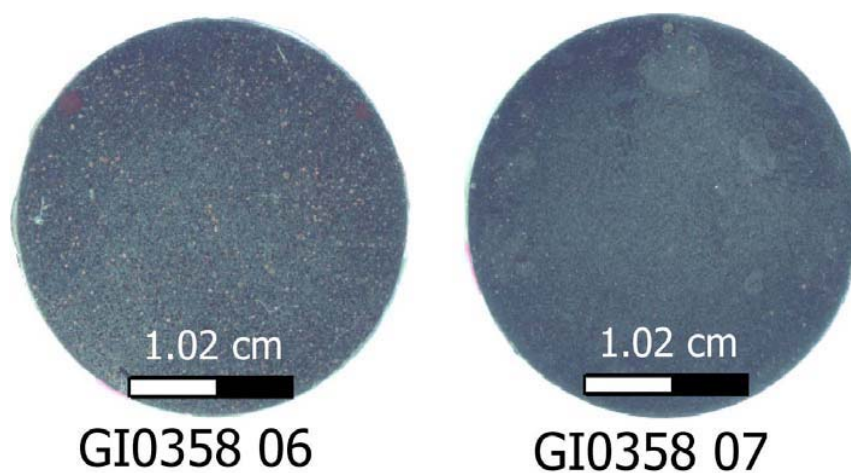


FIGURA 49 – Seções polidas subfrações aderentes do *sinter feed* do minério GI 0358.

O minério Tipo II é predominante em relação aos outros tipos de minério, sendo seguido pelo minério Tipo I, e pelo minério Tipo III. Esta distribuição evidencia que as partículas primárias deste minério apresentam uma porosidade intermediária a porosa. Como pode ser observado pelos dados da TABELA 36.

As subfrações aderentes do minério GI 0358 são compostas de pequenos agregados de cristais de HI e cristais isolados de Mt com Hr e/ou HI associado. Esses agregados são subfrações granulares, como pode ser observado pelo grau de alongação na TABELA 37 e FIGURA 50.

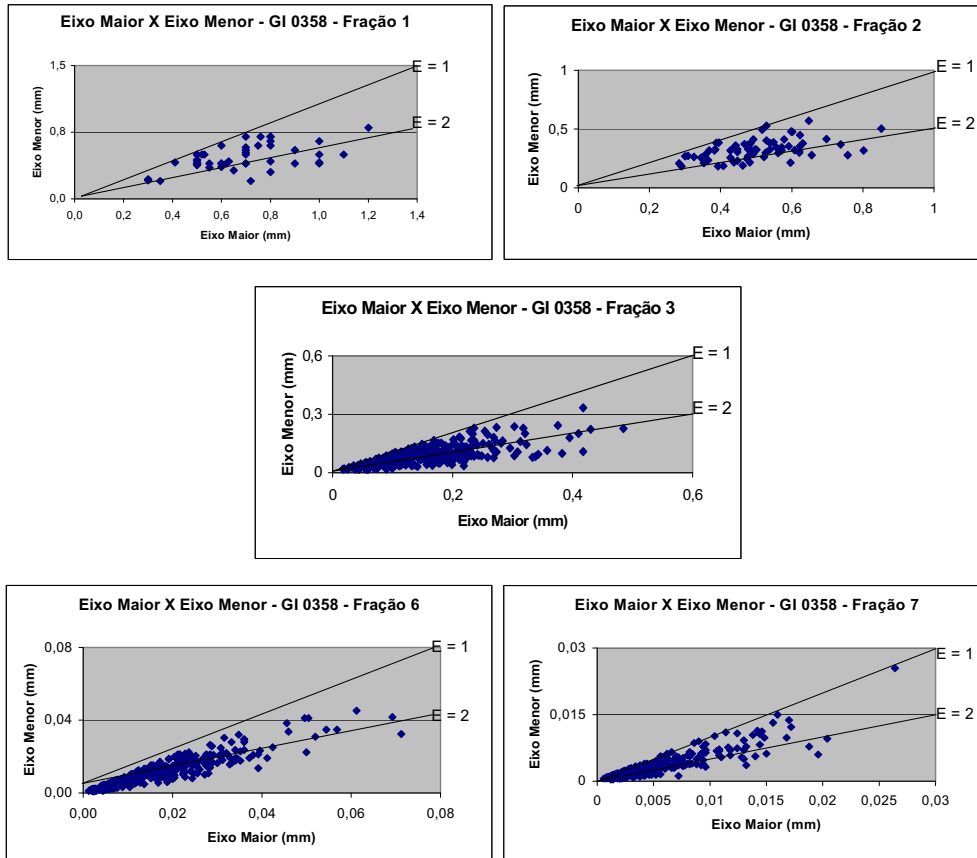


FIGURA 50 – Razão entre os eixos maior e menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).

Tipo Nucleante	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Tipo I (%)	Tipo II (%)	Tipo III (%)
GI0358 – 01	6.80	4.70	1.53	6.98	60.47	32.55
GI0358 – 02	4.85	3.12	1.62	11.86	69.49	18.64
GI0358 – 03	1.49	1.01	1.45	30.59	48.23	20.59
Média			1.53	16.48	59.40	23.93

TABELA 36 – Características principais das subfrações nucleantes do minério GI 0358.

Tipo Aderente	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Cristal (%)	Agregado (%)
GI0358 – 06	0.0275	0.0183	1.60	14.00	86.00
GI0358 – 07	0.0026	0.0023	1.12	51.67	48.33
Média			1.36	32.84	67.16

TABELA 37 - Características principais das subfrações aderentes do minério GI 0358.

VI.5.4 – DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA

O minério GI 0358 é composto de partículas primárias martíticas com Hr e HI e Mh subordinados com porosidade intermediária. Os cristais de Mt formam agregados granulares e podem ter a presença de resquícios de Mg ou não. Esses cristais de Mt podem ter-se transformado para Hr, no entanto a sua individualização é difícil, assim sendo, aqui serão descritas em sua maioria como Mt. Os cristais de HI são encontrados dispersos na matriz martítica, podendo estar levemente orientados que, localmente, definem uma suave foliação ao minério. Conforme pode ser observado na TABELA 38 e GRÁFICO 05.

Subfração	Mg	Mt	Hr	HI	Mh	Qz	Pr	Total
358 – 1	9,59	30,51	13,90	1,14	2,70	0,00	42,13	99,97
358 – 2	9,80	42,92	10,13	3,02	0,49	0,00	33,63	99,98
358 – 3	18,20	18,30	14,28	8,36	1,06	0,00	39,78	99,97
358 – 6	16,63	45,22	13,30	0,00	5,57	0,00	19,24	99,97
358 – 7	7,79	42,38	28,18	5,47	2,63	0,96	12,58	99,98

TABELA 38 – Distribuição Mineralógica das subfrações de *sinter feed* do minério GI 0358.

A distribuição mineralógica média deste minério mostra que nas subfrações nucleantes há um predomínio de agregados de Mt, seguido de Mg e HI e presença de HI e Mh subordinados, com porosidade variando em torno de 37%.

Na subfração 6, encontra-se uma quantidade muito maior de Mt, seguido de cristais de Mt e HI associada, de cristais isolados de HI, agregados de cristais de HI e cristais de Mt isolados; os cristais isolados representam assim uma parcela pequena nesta subfração.

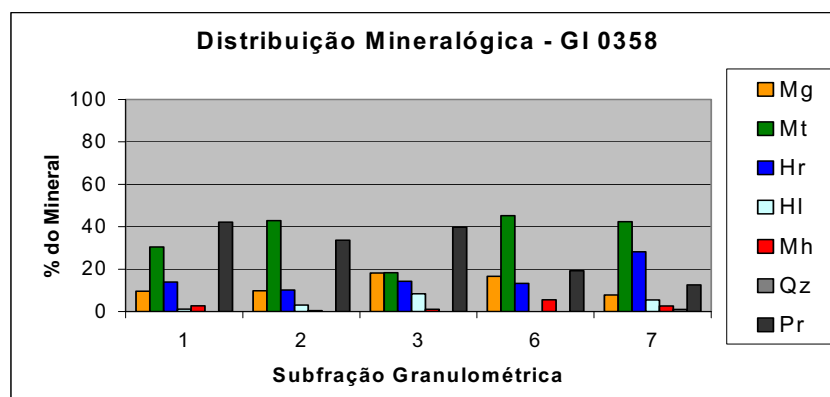


GRÁFICO 05 - Distribuição Mineralógica das subfrações de *sinter feed* do minério GI 0358. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)

Na subfração 7, os agregados de cristais de Mt são de maior contribuição, seguidos de cristais isolados de HI e de Mt e nos agregados de HI, apesar dessa contribuição significativa dos cristais isolados de HI e de Mt, esta subfração apresenta uma distribuição relativamente homogênea entre cristais isolados e agregados de cristais. A média de cristais isolados e de agregados de cristais nas subfrações aderentes é de 32,84% e 67,16%, respectivamente. Esse minério apresenta maior contribuição dos agregados nas subfrações aderentes que os demais minérios.

VI.6 – Minério HI 0348

Classificação: Minério Hematítico poroso a compacto

Textura: granular

Composição Mineralógica: Hematita Microcristalina Recristalizada, Hematita Granular e Hematita Lamelar, localmente, Mineral Hidratado.

VI.6.1 – DESCRIÇÃO DOS PARTÍCULAS PRIMÁRIAS

As partículas primárias são equigranulares, subangulosas a subarredondadas de contorno irregular, sendo que alguns apresentam borda angulosa (FIGURA 51).

O minério HI 0348 pode ser dividido em quatro tipos (FIGURA 51): Tipo I – Minério Compacto; Tipo II – Minério Bandado; Tipo III – Minério Poroso; Tipo IV – Minério Hidratado. Os três primeiros tipos de minérios são formados basicamente de uma matriz hematítica microcristalina (Hm), com porções de Hr e Pr com HI associado dispersos. No último tipo, no entanto, são partículas primárias, compostas basicamente de Mh, com cristais de hematitas dispersas ou intercaladas, formando bandamento, podem ser compactos ou porosos.

Tipo I – as partículas primárias hematíticas são compostas basicamente por Hm que formam uma matriz homogênea. Essa matriz pode ser cortada por veios ou estruturas granulares que lembram a forma dos cristais de Mg (apenas sua forma preservada), substituídos por cristais Hm, Hr ou HI.

Tipo II – Esse tipo de minério apresenta bandamento entre a matriz Hm, bandas de cristais Hr e bandas de matriz hidratada. As partículas primárias deste tipo podem apresentar o bandamento bem ritmado ou com variações na espessura das bandas, bem como podem estar dobrados ou cortados por fraturas preenchidas por Hr ou HI.

Tipo III – esse tipo de minério apresenta a matriz de Hm cortada por Pr, que pode estar ou não preenchidas por Hr e HI; é mais facilmente observada sua associação com material hidratado.

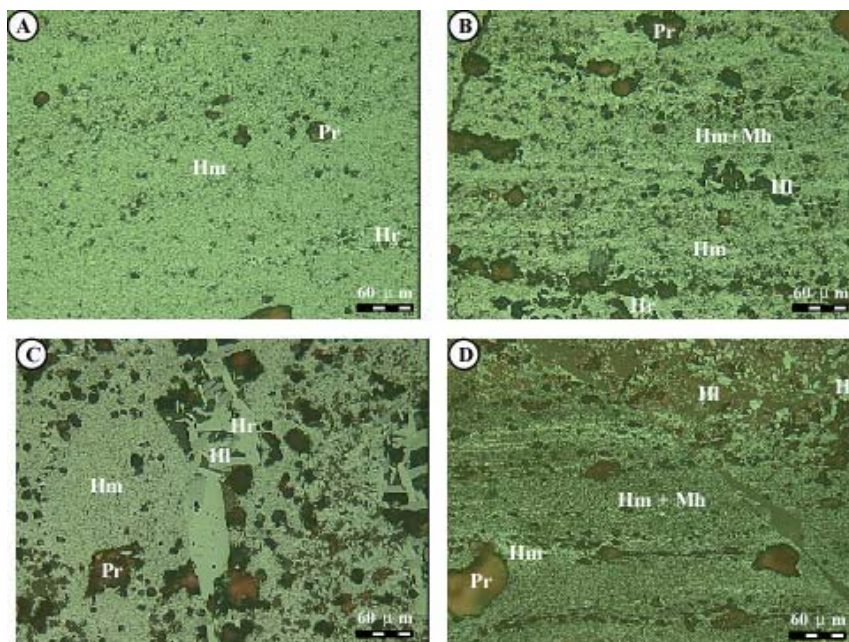


FIGURA 51 – Fotomicrografias de diferentes tipos apresentados pelo Minério HI 0348. (A) Minério tipo I, composto basicamente de Hm com agregados de Hr disperso, bastante compacto; (B) Minério tipo II, composto de bandas de Hm, bandas de Hm e Mh e bandas de Hr e HI intercaladas com bandas mais porosas; (C) Minério tipo III, com matriz composta por Hm entrecortada por Pr preenchidos por Hr e HI; e (D) Minério tipo IV, composto predominantemente por bandas de Hm + Mh, com bandas de Hm e Pr subordinados, nas porções mais porosas podem ser encontradas cristais de Hr e HI dispersos. (Luz polarizada).

Tipo IV – esse tipo de minério é composto basicamente de Mh com presença de cristais isolados de Hr e/ou HI, bem como agregados de Hm. O minério deste tipo pode ser poroso ou compacto.

Pode-se resumir as características principais de cada tipo de partícula primária na seguinte TABELA 39.

VI.6.2 – DESCRIÇÃO MINERALÓGICA

Características Principais	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Grau de porosidade	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Grau de arredondamento	Anguloso a Subanguloso	Subanguloso a Subarredondado	Subarredondado	Arredondado
Superfície de contorno	Reto	Reto a Irregular	Irregular	Irregular
Textura	Microcristalina	Microcristalina	Microcristalina	Amorfa

TABELA 39 – Principais características das partículas primárias das subfrações nucleantes do minério HI 0348.

Hematita granular microcristalina (Hm) – apresenta cristais anédricos, granulares superfície lisa e contornos irregulares a interdigitados, forma uma matriz microcristalina. Essa matriz é composta de cristais microcristalinos de hematita e uma Hr muito fina com tamanho médio, menor que 3 μm . Podem ocorrer na forma de bandas intercaladas, ou distribuídas na forma de agregados associados.

Hematita Granular (Hr) – Os cristais podem ser encontrados preenchendo os buracos com as formas cristalinas da Mg preservadas ou como agregados granulares e/ou bandas envoltos pela matriz hematítica microcristalina: são cristais maiores e melhores cristalizados que a Hm. Os cristais dessa hematita são anédricos, granulares a alongados de superfície lisa e contornos irregulares, com tamanho médio de 15 μm .

Hematita lamelar (HI) – São cristais subeuédricos, alongados de superfície lisa e contorno reto, com tamanho médio de 18 μm . Estes cristais são encontrados cristalizados, principalmente, dentro das formas cristalinas da Mg, geralmente associados com Pr, às vezes, são aciculares. Podem ser encontrados dispersos na matriz hematítica microcristalina, mas é uma ocorrência restrita.

Mineral hidratado (Mh) – É encontrado como uma massa amorfa, formando uma matriz compacta, envolvendo os cristais de Hr e HI e Pr nas partículas primárias

hidratadas e nas partículas primárias hematíticas; são encontradas preenchendo Pr e fraturas.

Poros (Pr) – São irregulares de tamanho variado; seu tamanho médio é 28 μm ; em algumas partículas primárias apresentam-se alinhadas, definindo melhor o bandamento. Em partículas primárias compactas são pequenos, acompanhando a granulometria da Hm; em partículas primárias porosas, podem chegar a vários milímetros.

VI.6.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS SUBFRAÇÕES DO *SINTER FEED*

O minério HI 0348 apresenta as seguintes subfrações: Nucleantes HI 0348-1, HI 0348-2 e HI 0348-3 (FIGURA 52); Aderentes HI 0348-6 e HI 0348-7 (FIGURA 53).



FIGURA 52 – Seções polidas das subfrações nucleantes do *sinter feed* do minério HI 0348.

As subfrações nucleantes são partículas primárias compostas de matriz de Hm com agregados de cristais de Hr, HI e Pr dispersos; nesta matriz, em algumas partículas primárias, podem apresentar Mh associado na forma de massa

amorfa, intercalada ou como grânulos dispersos na matriz microcristalina. Apresentam também partículas primárias hidratadas com agregados de Hm e cristais isolados de Hr e HI e Pr, dispersos nessa matriz hidratada.

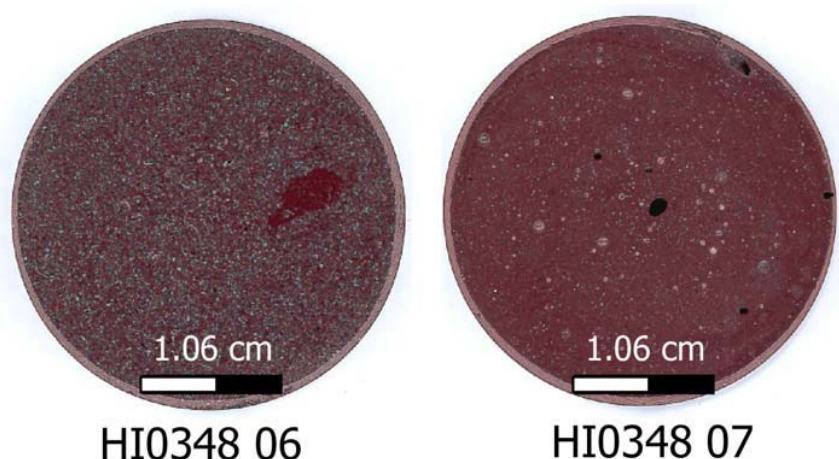


FIGURA 53 – Seções polidas subfrações aderentes do *sinter feed* do minério HI 0348.

As partículas primárias dessas subfrações são granulares a pouco alongadas, com grau de alongação médio de 1,85, indicando que as partículas primárias desse minério nas subfrações nucleantes são pouco alongadas (FIGURA 53). Na FIGURA 53 são apresentadas as razões entre eixo maior e eixo menor das partículas primárias medidas nestas subfrações.

O minério Tipo II é predominante em relação aos outros tipos de minério, sendo seguido pelo minério Tipo I; minério Tipo II e pelo minério Tipo IV. Nesse minério, há maior contribuição das partículas primárias bandadas; as porosas e compactas apresentam uma distribuição homogênea, sem diferenças significativas. Outro ponto a destacar, é com relação à contribuição do tipo hidratado, que é maior que nos outros minérios. Como pode ser observado pelos dados da TABELA 40.

As subfrações aderentes do minério HI 0348 são compostas de agregados de cristais de Hm e cristais isolados de Hr e HI. Esses agregados são subfrações granulares, como pode ser observado pelo grau de alongação conforme TABELA 41 e FIGURA 54.

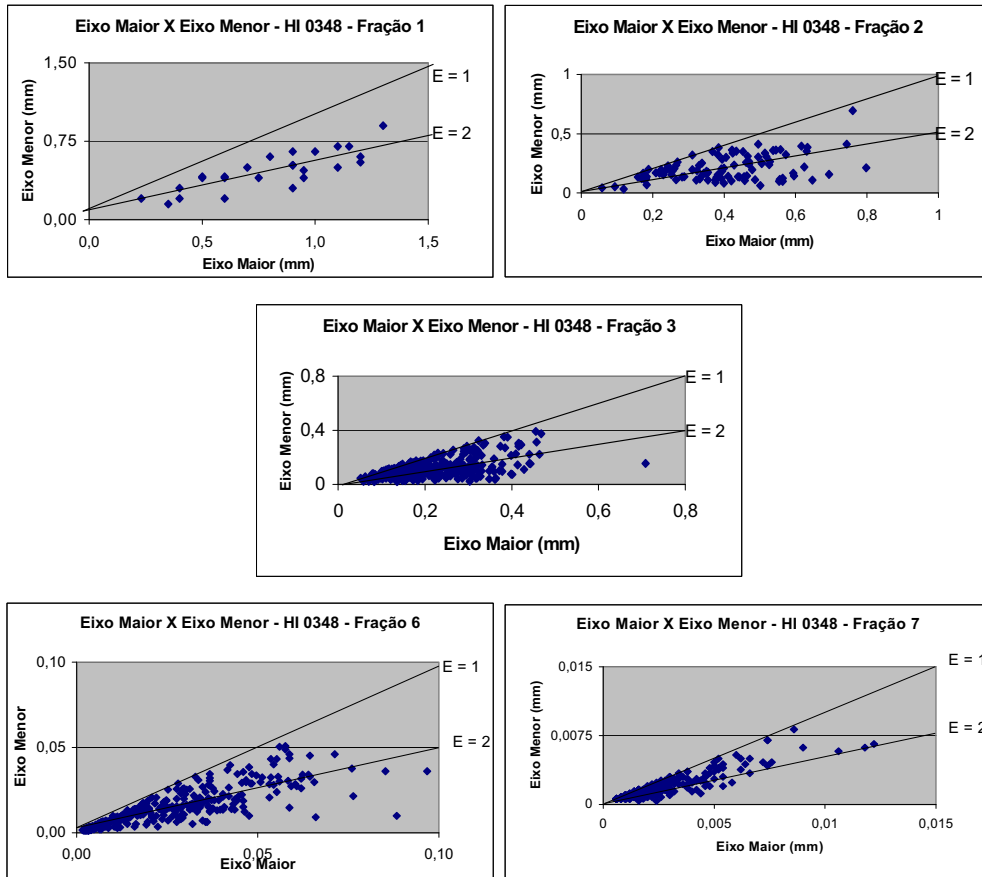


FIGURA 54 – Razão entre o eixo maior e eixo menor dos fragmentos medidos das subfrações nucleantes e aderentes (E = 1 – Granular e E = 2 - Alongado).

Tipo Nucleante	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Tipo I (%)	Tipo II (%)	Tipo III (%)	Tipo IV (%)
HI0348 – 01	7.60	4.60	1.75	15.38	69.23	11.54	3.85
HI0348 – 02	3.99	2.07	1.92	14.58	68.75	12.5	4.17
HI0348 – 03	2.17	1.17	1.87	11.11	68.52	14.81	5.56
Média			1.85	13.69	68.83	12.95	4.53

TABELA 40 – Características principais das subfrações nucleantes do minério HI 0348.

Tipo Aderente	Eixo Maior (mm)	Eixo Menor (mm)	Elongação	Cristal (%)	Agregado (%)
HI0348 –06	0.0390	0.02257	1.90	18.33	81.67
HI0348 –07	0.00125	0.0008	1.47	86.33	13.67
Média			1.69	52.33	47.67

TABELA 41 – Características principais das subfrações aderentes do minério HI 0348.

VI.6.4 – DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA

Este minério é composto de partículas primárias hematíticas microcristalinas, com Hr e HI e Mh subordinados com porosidade intermediária. Os cristais de Hm formam a matriz microcristalina dominante neste minério; podem ser encontrados como agregados granulares ou como bandas mais porosas intercaladas com porções mais compactas. São cortadas por fraturas ou Pr preenchidos por Hr e em menor escala, HI ou pequenos nódulos de Mh. Algumas partículas primárias apresentam uma matriz hidratada com cristais de Hr e HI dispersos, bem como pequenos agregados de Hm.

Os Pr, preenchidos de algumas partículas primárias, apresentam a forma cristalina da Mg, que podem ter sido substituídas ou lixiviadas do minério. A maioria das partículas primárias desse minério apresenta bandamento, dado principalmente pela diferença de porosidade da matriz microcristalina, podendo ser encontradas bandas de Hr ou bandas mais hidratadas ou alinhamento de Pr com forma de Mg preenchidas com Hr e HI, intercaladas com bandas de matriz microcristalinas. A distribuição mineralógica, por subfração de *sinter feed*, pode ser observada na TABELA 42 e no GRÁFICO 06.

Subfração	Hm	Hr	HI	Mh	Pr	Qz	TOTAL
348 – 1	48,57	8,37	5,06	12,53	25,45	0,00	99,98
348 – 2	50,32	12,07	7,27	3,24	27,07	0,00	99,98
348 – 3	56,66	5,06	0,13	8,24	29,76	0,13	99,98
348 – 6	55,95	2,55	1,01	22,93	17,54	0,00	99,98
348 – 7	65,90	5,67	4,30	13,12	10,99	0,00	99,98

TABELA 42 – Distribuição Mineralógica das subfrações de *sinter feed* do minério HI 0348.

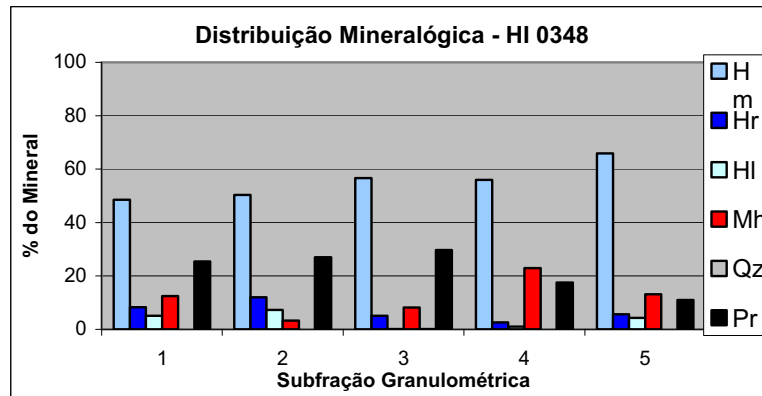


GRÁFICO 06 - Distribuição Mineralógica das subfrações de *sinter feed* do minério HI 0348. (1, 2 e 3 – Subfração Nucleante; 6 e 7 – subfração aderente)

A distribuição mineralógica média do minério HI 0348 mostra que, nas subfrações nucleantes, há um predomínio de agregados de Hm, seguido de Hr, HI e Mh, apresentam um baixo grau de porosidade, podendo ser consideradas partículas primárias compactas, cuja porosidade não passa de 30%. Dentre os minérios estudados, este é o minério que apresenta as partículas primárias das subfrações nucleantes com a mais baixa porosidade.

A subfração 6 apresenta uma quantidade significativa de agregados de Hm, com outros minerais subordinados, com uma pequena parcela de cristais isolados.

Na subfração 7, os agregados de cristais de Hm reduziram-se drasticamente, sendo substituídos por cristais isolados desta hematita e também de cristais isolados de Hr com outros minerais subordinados. A média de cristais isolados e de agregados de cristais nas subfrações aderentes é de 52,33% e 47,67%, respectivamente. Esse minério apresenta maior contribuição balanceada entre os cristais isolados e os agregados nas subfrações aderentes.

VI.7 – Considerações sobre a Descrição dos Minérios

Neste capítulo pode-se observar que os minérios estudados apresentam diferentes características mineralógicas, texturais e estruturais.

A mineralogia dos minérios apresenta algumas variações, sendo principalmente, no grau de recristalização da hematita, pois é o mineral dominante em todos os minérios, encontrado sob diferentes formas e tamanhos.

A hematita é um mineral presente em todos os minérios, apresentando diferentes formas de ocorrência, seja como produto da Mg, mineral primário ou produto da recristalização da própria hematita primária. Esta diversidade de geração de hematita evidencia diferentes formas, tamanhos e arranjo de cristais, que influenciam durante o processo de sinterização, como será visto no Capítulo VIII.

A hematita como produto da Mg ocorre como uma fase intermediária, denominada Mt, passando a Hr quando o grau de cristalização é mais elevado, ou seja, é o estágio final do processo de martitização. O processo de martitização no seu estágio final é observado, principalmente, nos minérios GI 0348 e GI 0166, ambos associados ao processo de hidratação, que é mais intenso no último minério.

A hematita como mineral primário, denominada de hematita granular, ocorre como cristais menores e arranjo imbricado dos cristais, indicando baixo grau de cristalinidade, como o caso dos minérios GI 0137 e HI 0348.

A hematita secundária, gerada a partir de uma hematita primária, denominada de hematita lamelar, encontra-se nos minérios GI 0164 e GI 0165: são minérios com cristais grandes e bem formados, podem estar orientados ou não. Esse mineral foi gerado em ambientes de deformação, cuja pressão e temperatura permitiram a sua cristalização.

Como se pode ver, a diferença da forma de ocorrência dos cristais de hematita, passam de cristais micrométricos (HI 0348) até cristais milimétricos (GI 0164). A diferença no seu tamanho faz com que o arranjo e a forma dos cristais, sejam diferenciados, influenciando no processo de oxidação da hematita na sinterização.

Outro mineral importante é o Mh: a sua presença auxilia durante o processo de nucleação das micropelotas, cuja água presente em quantidade adequada facilita este processo.

O mesmo ocorre com o mineral Qz: a sua presença auxilia na formação dos silicatos ferríticos, que fazem as pontes de ligação no sínter, permitindo a geração de um sínter poroso e resistente ao mesmo tempo, cuja quantidade adequada auxilia nos parâmetros de qualidade do sínter.

A porosidade do minério é importante por permitir que os gases quentes, gerados durante a sinterização, consigam ter maior penetração dentro das partículas primárias de minérios, facilitando o processo.

Como se pode ver, o minério entra em maior proporção na mistura a sinterizar, portanto as suas características internas e externas com certeza influenciam no processo. Assim como será visto no Capítulo IX, pode-se fazer as correlações entre essas características geológicas do minério e os parâmetros metalúrgicos do sínter.

VII – RESULTADOS DO ESTUDO GEOLÓGICO

No presente estudo, foi observado que as amostras da fração *sinter feed* dos minérios estudados apresentam variações composicionais e estruturais tanto entre os diferentes tipos de minérios, como entre as subfrações granulométricas de um mesmo minério. Essas variações são refletidas no comportamento, destas subfrações granulométricas, no processo de sinterização e no seu desempenho nos índices de qualidade do sinter gerado.

VII.1 – Caracterização Química

As análises químicas das amostras de *sinter feed* dos minérios foram feitas para uma das seguintes frações granulométrica: subfrações nucleantes 1, 2, e 3 e as duas subfrações aderentes. A presença de determinados elementos pode beneficiar ou prejudicar o processo e o próprio produto final, como pode ser visto pela TABELA 14.

Os compostos e elementos analisados foram: Fe total [Fe(t)]; FeO, SiO₂, Al₂O₃, MnO, TiO₂, P₂O₅, S, CaO, K₂O, Na₂O, ZnO, MgO e PPC (Perda Por Calcinação). Destes compostos, apenas os 8 primeiros e o PPC foram plotados em gráficos. Os demais elementos, além de apresentarem valores muito baixos, não mostraram variações nas suas subfrações granulométricas e nem de um minério para outro.

Por meio destas análises observa-se que há variação na composição entre as subfrações nucleantes e aderentes de um mesmo minério. Para uma melhor visualização e devido à concentração diferenciada entre o Fe(t) (GRÁFICO 07), o PPC (GRÁFICO 08) e os demais componentes (GRÁFICO 09 ao 15), estes compostos foram dispostos em gráficos separados.

Como poderá ser visto nos gráficos abaixo, há uma heterogeneidade nos teores de Fe(t), PPC e demais elementos químicos dentro de um mesmo minério, com uma variação maior quando comparados as subfrações nucleantes e aderentes. A seguir serão descritas as principais características de cada tipo de minério.

VII.1.1 – Fe(t)

O teor de Fe(t) dos minérios é um dos critérios utilizados na escolha dos minérios pelas usinas siderúrgicas, cujo teor varia de acordo com o balanço de

massa da carga a ser sinterizada, sendo assim um dos itens de grande importância no processo de sinterização.

Nos minérios estudados, o teor de Fe(t), apresenta quantidades relativamente próximas, aproximadamente 70%, com os teores das subfrações nucleantes maiores que das subfrações aderentes. Apenas os minérios GI 0166 e o HI 0348 apresentam teores mais baixos, em torno de 65 % e com maior grau de variação entre suas frações granulométricas, conforme pode ser observado no GRÁFICO 07.

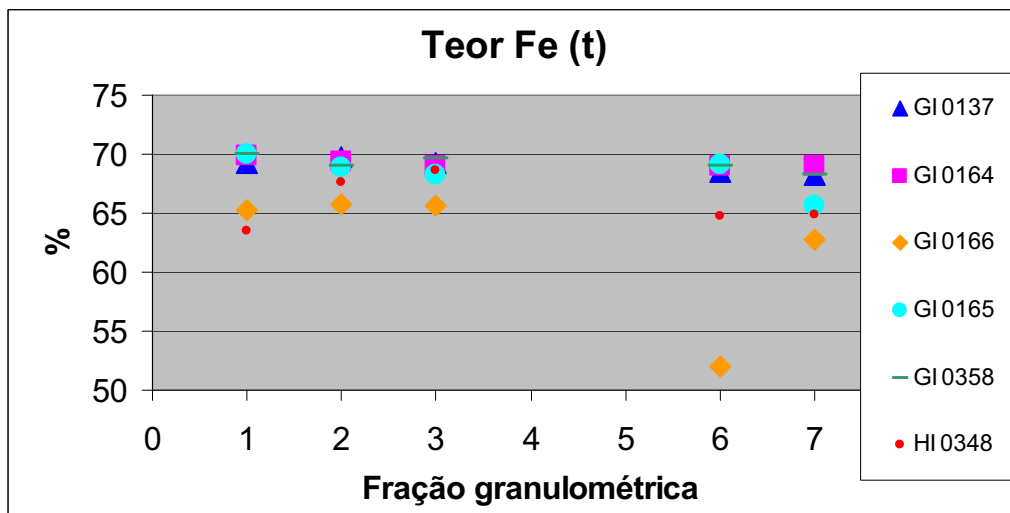


GRÁFICO 07 – O gráfico acima apresenta as variações do teor de Fe(t) das frações granulométricas de cada tipo de minério. A descrição detalhada encontra-se no texto.

Os minérios com os menores teores de Fe(t) são que têm maiores contribuições dos minerais hidratados na sua composição mineralógica; como pode ser visto no Capítulo II, os minerais hidratados são os que possuem as menores quantidades de Fe na sua estrutura cristalina. Esses minérios também apresentam comportamentos diferenciados em relação aos demais minérios. O menor valor de Fe(t) da subfração 6 do minério GI 0166 deve-se, provavelmente, a maior participação de SiO₂ nessa subfração, conforme pode ser visto no GRÁFICO 12.

Os teores de Fe(t) nas subfrações granulométricas dos minérios estudados mostram que, em algumas subfrações há maior ou menor quantidade de Fe(t), devido a menor ou maior presença de outros elementos nessas mesmas subfrações.

VII.1.2 – PPC

O teor de PPC de um minério influencia na contração do bolo durante o processo de sinterização. Um aumento substancial do PPC dos minérios da mistura provoca, através da contração do bolo, a formação de trincas maiores, favorecendo a passagem preferencial de ar no leito. O valor do PPC aceitável varia em função do balanço de massa no alto forno de cada empresa.

Os minérios hidratados apresentam valores maiores de PPC que os minérios anidros. A dosagem adequada dos minérios hidratados e anidros, favorece a etapa de microaglomeração e aumenta a produtividade da máquina de sinterizar (VIEIRA et al., 1998; PIMENTA et al., 1999).

No GRÁFICO 08, os minérios com os menores teores de PPC são: GI 0137, GI 0164 e GI 0358; em todas as suas frações granulométricas encontram-se abaixo de 1%. Esses dados são condizentes com a afirmação acima, visto que estes minérios são considerados anidros, i.e., baixa quantidade de minerais hidratados.

A distribuição dos teores de PPC nas subfrações nucleantes e aderentes dos minérios GI 0137, GI 0164 e GI 0358 é bastante semelhante; o minério GI 0164 é o que tem menor teor médio de PPC de todos minérios. Nesses minérios, há uma pequena variação no teor de PPC entre as três subfrações nucleantes e um pequeno aumento da subfração aderente mais grossa para a mais fina.

O minério GI 0165 apresenta um aumento no teor de PPC nas subfrações mais finas. Esse minério tem comportamento intermediário, em relação aos demais minérios.

Os maiores teores de PPC são encontrados nos minérios GI 0166 e HI 0348; novamente, são os que têm maiores quantidades de minerais hidratados, sendo o minério GI 0166 com o maior teor de PPC. Esses minérios mostram comportamento inverso aos demais minérios.

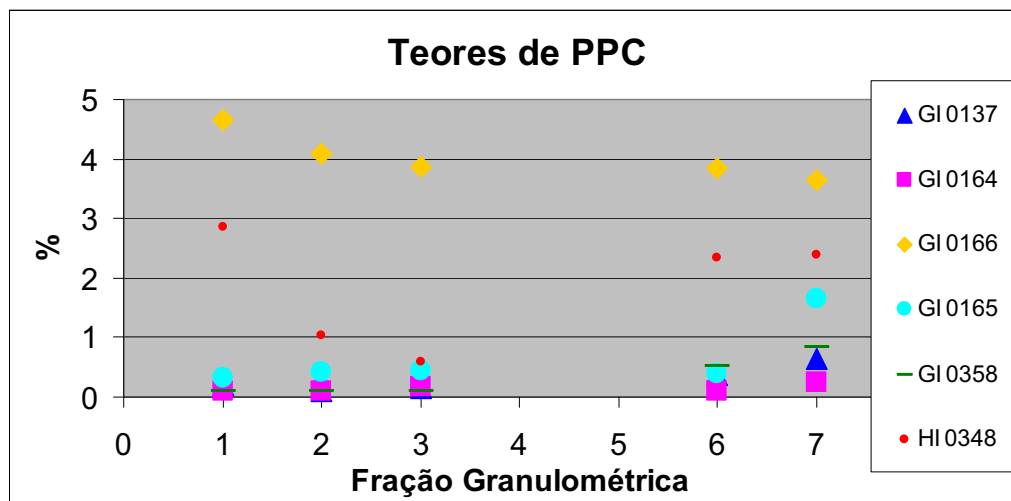


GRÁFICO 08 – Teores de PPC em cada fração granulométrica de todos os minérios estudados.

VII.1.3 – OUTROS ELEMENTOS

Os elementos analisados, cuja presença influencia de alguma forma no processo; bem como, os que apresentaram uma variação significativa foram dispostos em gráficos e discutidos, como poderá ser visto a seguir. Os demais estão colocados na TABELA 01 no ANEXO I.

VII.1.3.1 – FeO

A presença de FeO é importante, pois durante o processo de sinterização oxida-se, gerando uma reação exotérmica, o que pode reduzir a taxa de combustível sólido a ser adicionado na mistura (DAWSON, 1993).

O teor de FeO do sinter é influenciado pelas diferentes zonas do leito de sinterização, através da concentração da magnetita no sinter (ou o grau do estado de oxidação do ferro na fase vítrea, mais provavelmente o teor de Fe^{2+}) e também, é utilizado como um indicador para os valores dos índices de RDI e de redutibilidade do sinter gerado (LOO, 1998).

A utilização do teor de FeO no sinter, como um parâmetro de controle de qualidade deve ser cuidadosa, visto que qualquer alteração do teor de FeO na mistura, pode alterar profundamente o teor de FeO no sinter, sem necessariamente afetar os parâmetros de qualidade, como a resistência, por exemplo (LOO, 1998).

Os teores de FeO das diferentes frações granulométricas dos minérios estudados mostram pequenas variações (GRÁFICO 09), com exceção do minério GI 0358 (GRÁFICO 10).

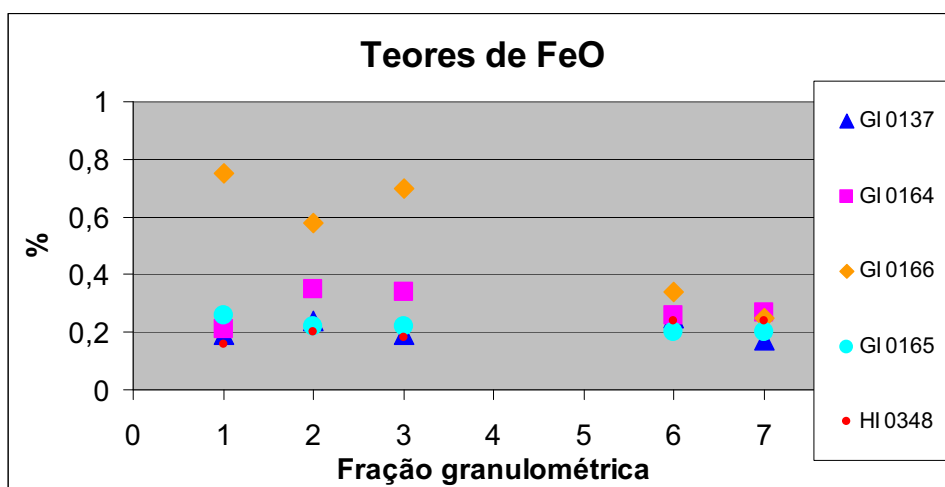


GRÁFICO 09 – Gráfico com os teores de FeO em cada fração granulométrica dos minérios GI 0137, GI 0164, GI 0166, GI 0165 E HI 0348.

No GRÁFICO 09, pode ser observado que, o minério GI 0166, tem teor de FeO nas subfrações nucleantes duas vezes maior que nas suas subfrações aderentes e nos demais minérios. Isso deve-se à maior contribuição de Mg nesse minério, conforme pode ser visto pela sua distribuição mineralógica, no Capítulo VI.

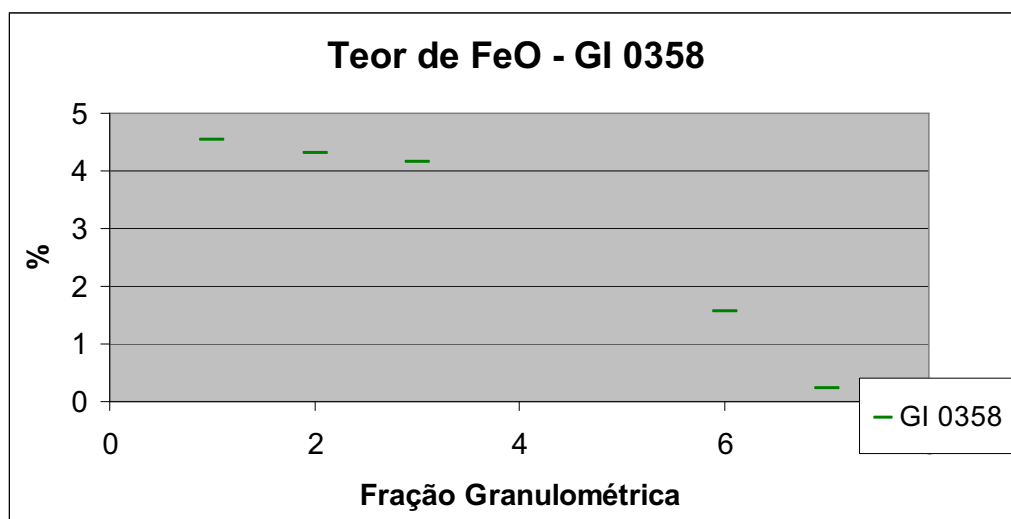


GRÁFICO 10 – Gráfico com o teor de FeO em cada fração granulométrica do Minério GI 0358.

O minério GI 0358 (GRÁFICO 10) tem teor de FeO bem maior que os demais minérios, além disso, mostra uma diminuição gradativa nas suas frações mais finas. A composição mineralógica desse minério, mostra maior contribuição da Mg que os demais minérios.

VII.1.3.2 – SiO_2

O teor de SiO_2 é utilizado para definir a basicidade do sinter a ser gerado, pois a sua presença na mistura auxilia na formação de SFCA (silicatos de

cálcio-ferrita), diminuindo o tempo de sinterização e aumentando a produtividade. O desvio padrão da basicidade do sinter é menor quando o teor de sílica na mistura não precisa ser ajustado pela adição de fundentes (PIMENTA et al., 1999).

A faixa de SiO_2 aceitável varia em função da basicidade e volume de escória do sinter utilizada por cada empresa. Baixo teor de SiO_2 implica menor volume de escória no alto-forno e menor consumo de fundentes, mas fragiliza o sinter, aumentando de RDI.

A sílica presente na mistura deve estar concentrada nas subfrações < 1,0 mm, não oclusa dentro das partículas nucleantes de minérios, para que participe das reações de sinterização (PIMENTA et al., 1999).

Os minérios estudados mostram um ligeiro aumento no teor de SiO_2 das subfrações nucleantes 1 para 3; nas subfrações aderentes 6 e 7: apresentam comportamento diferenciados entre os minérios (GRÁFICO 11). O minério GI 0166 apresenta comportamento bastante diferenciado, devido à maior presença de SiO_2 na sua subfração 6 (GRÁFICO 12).

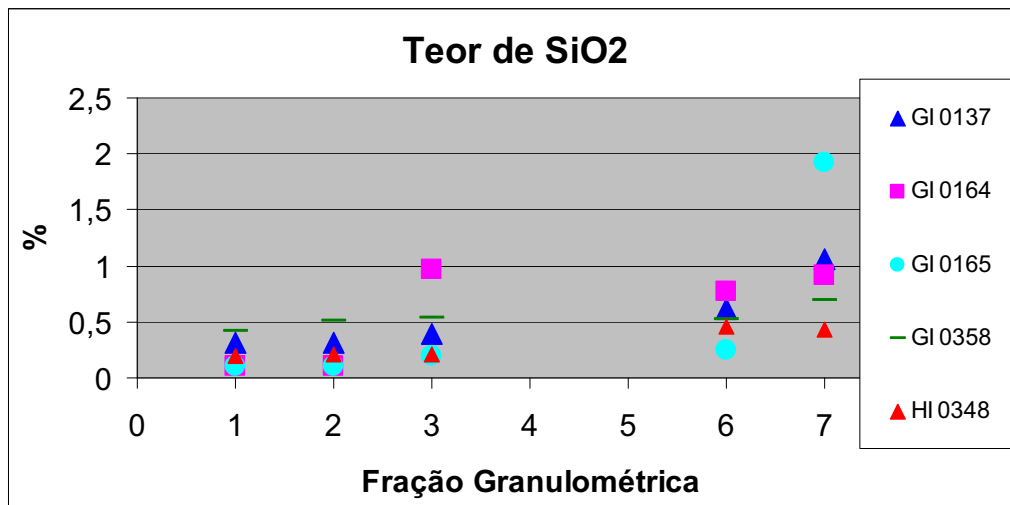


GRÁFICO 11 – Teor de SiO_2 das subfrações granulométricas dos minérios estudados, com exceção do minério GI 0166.

O minério GI 0166 (GRÁFICO 12) tem distribuição dos teores de SiO_2 bastante diferenciado e com maior quantidade que os demais minérios, principalmente nas subfrações aderentes. Essa concentração maior de SiO_2 na

subfração 6 do minério GI 0166, provavelmente, deve-se ao tamanho dos cristais de Qz, que ficam retidos nesta subfração.

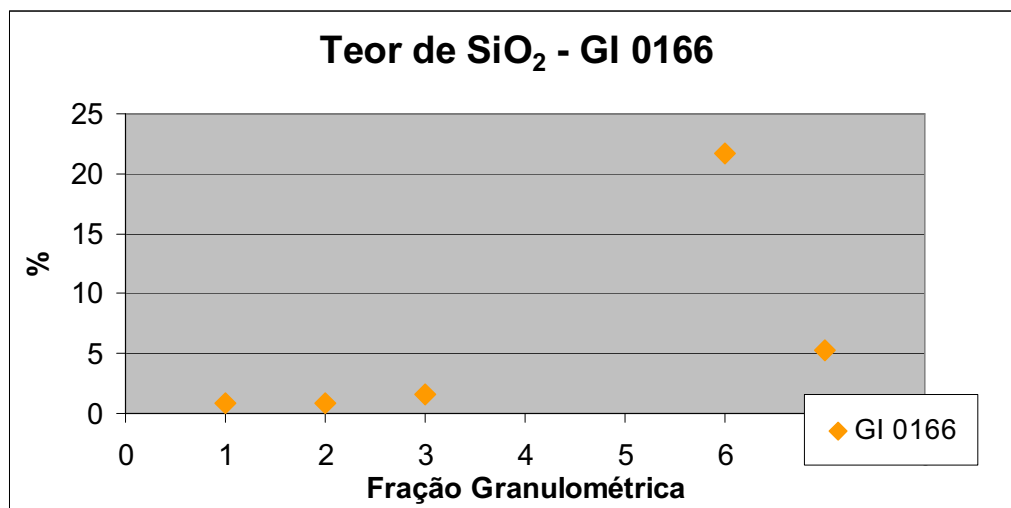


GRÁFICO 12 – Teor de SiO₂ das frações granulométricas do minério GI 0166 estudado.

VII.1.3.3 – Al₂O₃

O teor de Al₂O₃ na mistura varia em função da basicidade e volume de escória do sinter de cada planta de sinterização, mas é observado que baixo teor de alumina implica um menor volume de escória no alto-forno.

A alumina não deve estar oclusa dentro das partículas nucleantes de minérios nem concentrada nas subfrações mais finas dos minérios (<150 *mesh*); é constatado que o aumento na quantidade de alumina nas subfrações mais finas, aumenta fortemente o RDI do sinter (PIMENTA et al., 1999). Por outro lado, a Al₂O₃ nas subfrações mais grossas praticamente não participa das reações de sinterização. Estudos demonstram que a alumina na forma de gibbsita associa-se à hematita secundária mais facilmente que a caulinita (VIEIRA et al., 1998).

O minério que possui o mais alto teor de Al_2O_3 é o HI 0348; com declínio acentuado da subfração nucleante 1 (4,75%) para 3 (0,71%); na subfração aderente, seus teores também são altos, que é uma relação contrária aos demais tipos de minérios (GRÁFICO 13).

O minério com o segundo teor mais alto é o GI 0165; apresenta um ligeiro aumento no seu teor da subfração 1 para 3 e nas subfrações aderentes, apresenta um comportamento diferente dos demais, visto que há um aumento abrupto da subfração 6 para 7; mesmo assim é menor que o minério HI 0348.

Os demais minérios apresentam um padrão de comportamento bastante semelhante, com teores constantes nas subfrações nucleantes; nas subfrações aderentes têm um ligeiro aumento na subfração 7. O minério GI 0166 apresenta esse mesmo comportamento, mas possui teor pouco maior que os demais minérios.

Os minérios que apresentam teores maiores de alumina apresentarão índices de qualidade do sinter piores que os demais minérios, como poderá ser visto posteriormente.

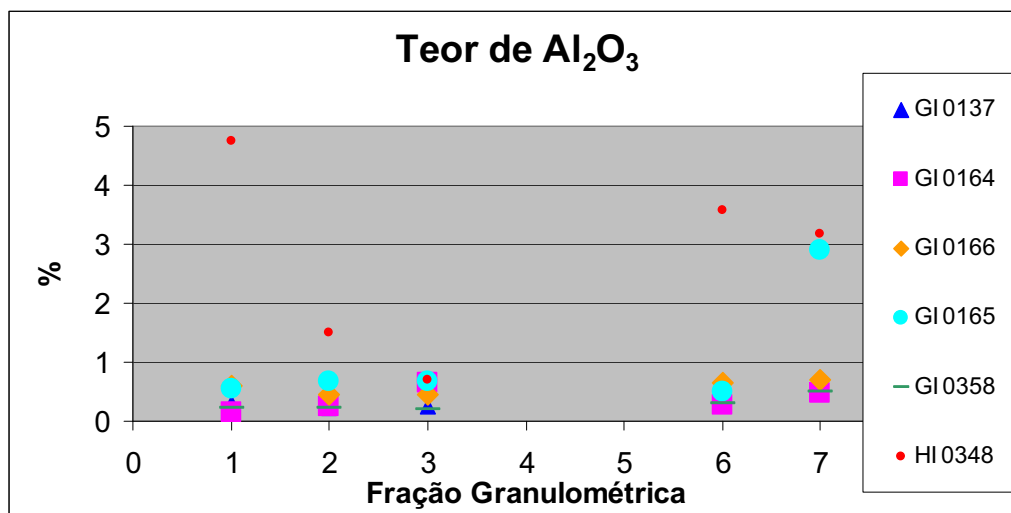


GRÁFICO 13 – Teores de Al_2O_3 das frações granulométricas de todos minérios estudados.

VII.1.3.4 – Fósforo

O fósforo é um elemento prejudicial à qualidade do aço, porque todo fósforo presente na carga ferrífera do alto forno vai para o ferro gusa, pois apenas 10% de sua quantidade é eliminada pelos processos de desfosforizações existentes.

O teor de fósforo aumenta quando há maior quantidade de goethita nos minérios e, normalmente, se encontra mais concentrado nas subfrações mais finas dos minérios, predominantemente, nas partículas aderentes (COELHO et al., 1999; SANTOS & BRANDÃO, 2003).

A quantidade permitida para este elemento varia em função do processo de cada usina, no entanto alto teor de fósforo implica custos adicionais com o processo de desfosforização do ferro-gusa ou do aço (CAPOLARI et al., 1998).

Os minérios que apresentam os maiores teores de fósforo são os mesmos que possuem maiores quantidades de minerais hidratados (GI 0166 e HI 0348), como pode ser observado pela comparação do GRÁFICO 14 com os GRÁFICOS 20 e 26. Esses minérios apresentam uma diminuição no teor de P_2O_5 da subfração nucleante 1 para 3 e teores mais elevados nas subfrações aderentes que nas subfrações nucleantes.

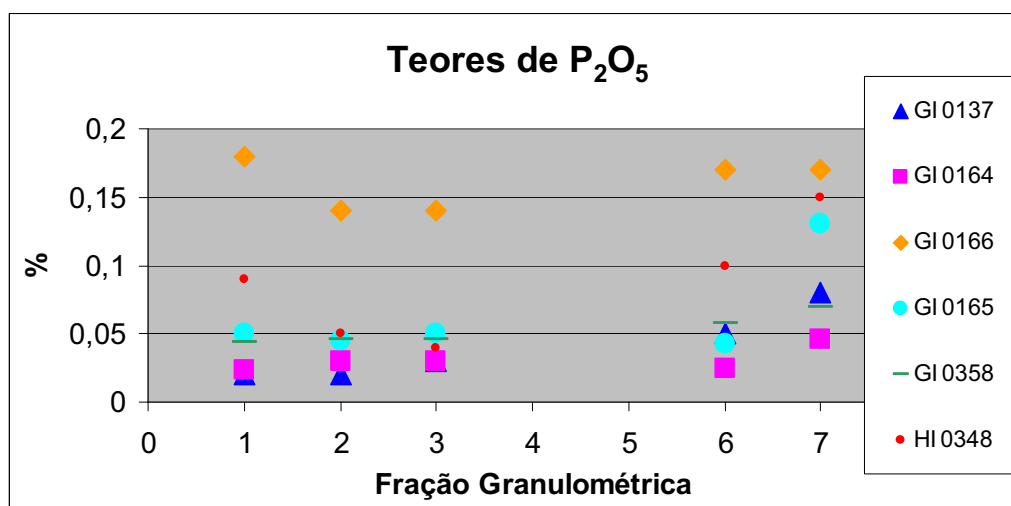


GRÁFICO 14 – Teores de P_2O_5 das frações granulométricas de todos minérios estudados.

Os minérios com teores intermediários de fósforo são: GI 0348 e GI 0165; com menores teores são: GI 0164 e GI 0137. As subfrações nucleantes desses minérios têm teores constantes de fósforo; nas subfrações aderentes, mostram aumento nos seus teores da subfração 6 para 7 e também são maiores que os da subfração nucleante.

VII.1.3.5 – MnO

O MnO é um dos elementos controlados como impureza dentro dos minérios; seu teor máximo aceitável fica em torno de 1%. Assim sendo, o teor de MnO dos minérios estudados encontram-se dentro do limite aceitável (GRÁFICO 15).

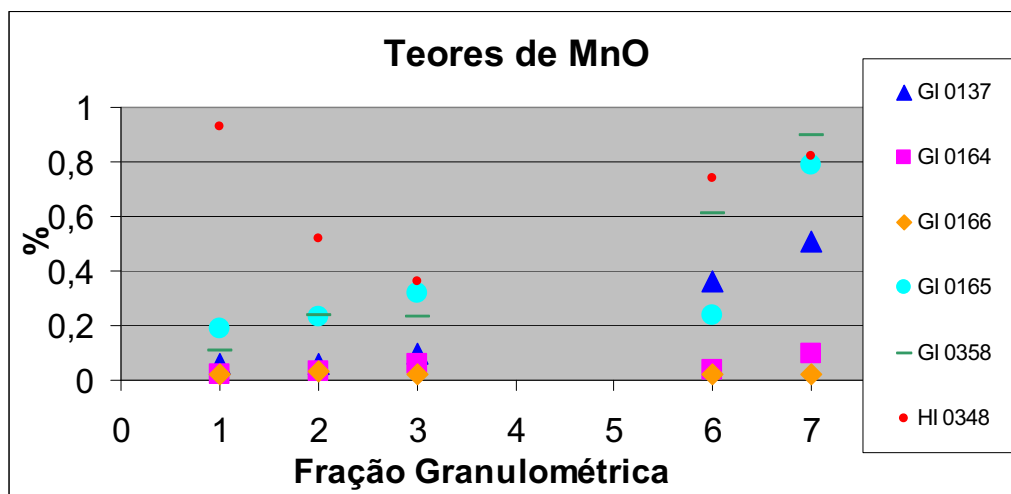


GRÁFICO 15 – Teores de P_2O_5 das frações granulométricas de todos minérios estudados.

O minério com maior teor de MnO é o HI 0348 e seu teor decresce da subfração 1 para 3. Na subfração aderente, apresenta os maiores valores também, juntamente com o minério GI 0358 e a subfração 7 do minério GI 0165.

Alguns minérios com comportamentos diferenciados são: GI 0137 tem baixos teores nas subfrações nucleantes e teores intermediários nas subfrações aderentes; GI 0165 mostra aumento mais acentuado que nos demais minérios das frações mais grossas para as mais finas, em ambas subfrações; o GI 0166 apresenta teores praticamente constantes em todas suas subfrações e menores que os demais minérios.

VII.2 – Caracterização Petrográfica

Nos estudos petrográficos das amostras escolhidas observa-se que há variação entre os diferentes tipos de minérios, em relação à mineralogia, grau de alongação, grau de porosidade e formas das partículas primárias nucleantes; e grau de liberação e alongação dos minerais nas subfrações aderentes.

A discussão será dividida em subfrações: nucleantes e aderentes (foram as subfrações enviadas) por apresentarem variações diferenciadas em relação aos tipos de minérios estudados, como será visto a seguir.

VII.2.1 – SUBFRAÇÕES NUCLEANTES

As subfrações nucleantes são representadas por partículas primárias com granulometria variando de 1,00 a 9,52 mm. Essas partículas primárias foram descritas, observando a sua forma externa e a sua forma interna.

A parte interna apresenta as variações mineralógicas e texturais. O grau de porosidade e o bandamento das partículas primárias podem estar associados, pois o bandamento observado, geralmente, é dado pela diferença no grau de porosidade das partículas primárias. Além disso, a morfologia dos cristais é importante pela sua influência na rugosidade da superfície externa das partículas primárias (CAPOLARI et al., 1998).

A parte externa é descrita pelo formato predominante das partículas primárias de cada tipo de minério, tais como: forma, grau de arredondamento e rugosidade de sua superfície. Nas seções polidas estudadas, é observado o contorno das partículas primárias presentes. O tipo de borda apresentada, pode ser lisa a irregular (rugosa), através dessa, faz-se a projeção para a superfície da partícula primária. Essas características observadas, são confirmadas pelas imagens de elétrons secundários (SE) obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV).

As características abaixo apresentadas serão representadas pela média das três frações granulométricas (Subfração 1, 2 e 3), caracterizadas como subfrações nucleantes. A descrição será feita da parte interna das partículas primárias, seguida da parte externa.

VII.2.1.1 – Mineralogia

A mineralogia entre os diferentes tipos de *sinter feed* dos minérios é relativamente heterogênea. Apesar de alguns minérios apresentarem a mesma classificação, os minerais de ferro encontrados nesses minérios são de diferentes formas, tamanhos e gerações, por exemplo, o caso dos minérios classificados de hematíticos, como poderá ser visto a seguir. As gerações dos diferentes tipos de minerais está associado à temperatura e pressão dominante durante sua formação (ROSIÈRE et al., 1993a; 1993b). Assim tem-se que, quanto maior a temperatura, maior o tamanho dos cristais e menor o grau de hidratação dos minérios (CAPOLARI et al., 1998).

VII.2.1.1.1 – *Magnetita*

A Mg é um mineral, geralmente, encontrada como resquícios dentro dos cristais de Mt ou Hr, indicando ter sofrido processo de martitização. Esse processo pode ser mais ou menos intenso, em algumas partículas primárias, dentro de um mesmo minério. Em alguns minérios, pode ocorrer maior ou menor associação com o processo de hidratação. Esse mineral é encontrado nos seguintes tipos de minérios GI 0164, GI 0165, GI 0166 e GI 0358 (FIGURA 55 e GRÁFICO 16).

Nos minérios GI 0164 e GI 0165, a Mg encontra-se bastante martitizada e é encontrada dentro de algumas partículas primárias isoladas ou parcialmente associadas às porções hematíticas. A Mg encontrada nesses minérios é, provavelmente, de origem tardia, gerada a partir de material que preenchem os veios que cortavam o minério hematítico. As partículas primárias com essa composição são pouco expressivas nesses minérios, tendo uma contribuição um pouco maior no minério GI 0165.

No minério GI 0166, a Mg encontra-se sofrendo intenso processo de martitização, geralmente, associado com processo de hidratação. Localmente, pode-se encontrar cristais desse mineral mais preservados.

No minério GI 0358, a Mg pode ser encontrada com diferentes intensidades de martitização. A Mg é encontrada como resquícios dentro dos cristais de Mt e Hr e também como cristal em início do processo de martitização. O

processo de hidratação nesse minério, ocorre de forma localizada e com intensidades diferenciadas: bastante incipiente a intenso.

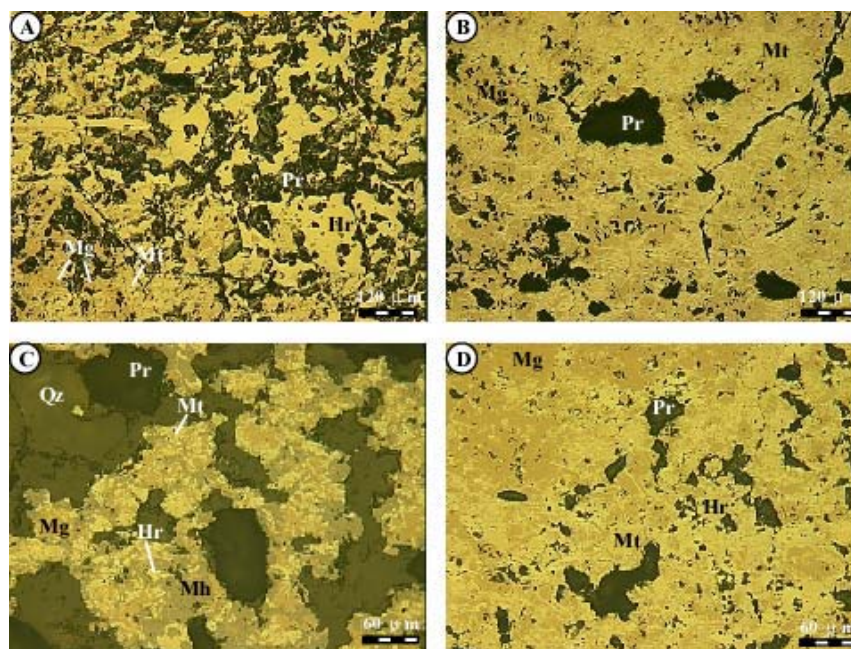


FIGURA 55 – Forma de ocorrência da Mg nos diferentes tipos de minério. (A) GI 0164; (B) – GI 0165, (C) GI 0166 e (C) GI 0358. Luz natural.

No GRÁFICO 16, o minério GI 0358 é o mais magnético de todos e apresenta uma distribuição relativamente homogênea em todas as partículas primárias. Enquanto que, no minério GI 0166, pode ser encontrado distribuído de forma heterogênea, com grande quantidade em algumas partículas primárias; em outras, pode ser encontrada como resquícios. Um ponto interessante desse mineral é que, geralmente, a sua transformação para a Mt está associada ao processo de hidratação. Nos minérios GI 0164 e GI 0165, restringem-se a apenas algumas partículas primárias encontradas, daí a sua menor quantidade.

VII.2.1.1.2 – *Martita*

A Mt é, geralmente, encontrada associada à Mg, sendo que nos minérios GI 0164 e GI 0165, é encontrada em menor quantidade, visto que a maior parte dos cristais de Mt já se transformaram em Hr. Nos minérios GI 0166 e GI 0358, a Mt é encontrada em maior quantidade, como pode ser observado no GRÁFICO 17.

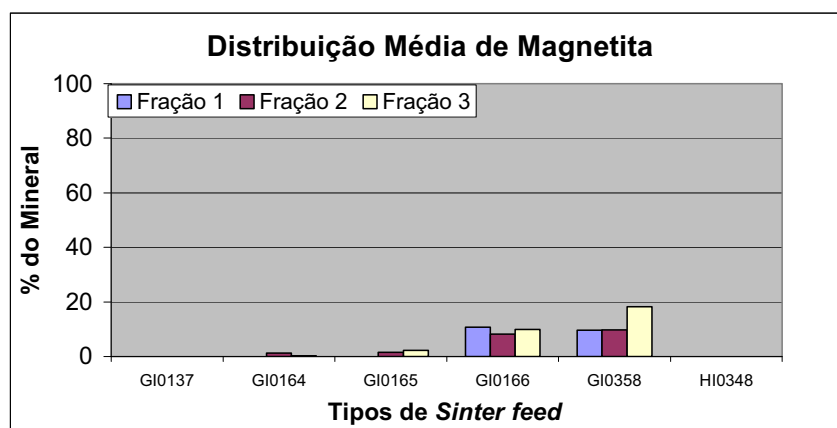


GRÁFICO 16 – Distribuição Média de Mg nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

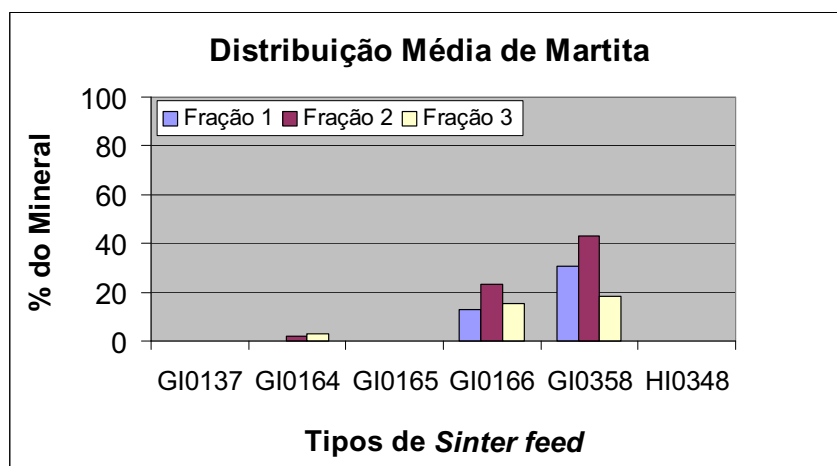


GRÁFICO 17 – Distribuição Média de Mt nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

No minério GI 0166, pode ser facilmente encontrada como cristal isolado; apresenta-se bastante porosa, granular, podendo ou não ter resquícios de

Mg, sendo mais freqüente a presença de Mh associado. E no minério GI 0358, os cristais de Mt podem ser encontrados, englobando resquícios de Mg e formando estruturas tipo treliças com as Mg.

Este mineral apresenta características óticas muito semelhantes às Hr, sendo difícil a sua separação. É caracterizado como Mt quando se apresenta muito porosa, com resquícios de Mg ou apresenta estruturas tipo treliças, conforme pode ser verificada na FIGURA 56 e 57.

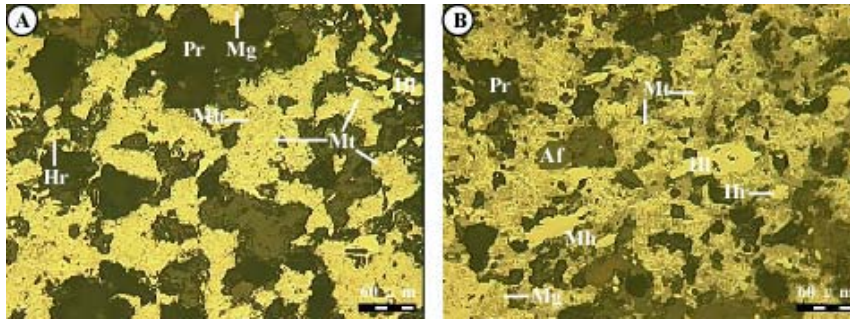


FIGURA 56 – Feições típicas da Mt. (A) superfície porosa e (B) estrutura tipo treliça. Luz natural.

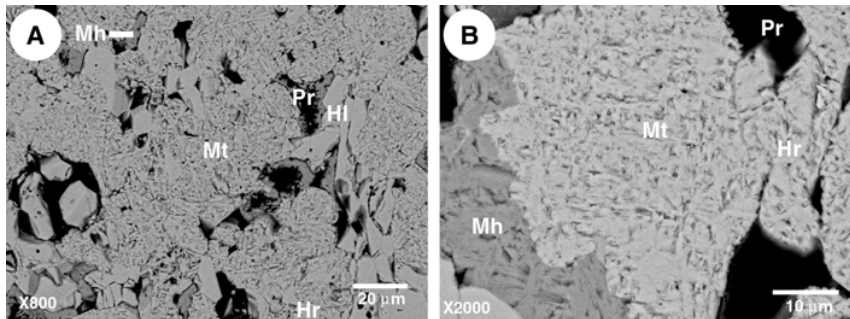


FIGURA 57 – Imagens de BSE obtidas no MEV, mostrando as feições típicas da Mt. Como podem ser vistas pelas imagens (A) e (B); no processo de martitização da Mg, ocorre a geração de Pr durante a transformação da Mg para Mt. (A) apresenta os cristais de Mt bastante porosos; localmente, ocorre a geração de Hr associada; nas porções mais porosas, encontram-se cristais de Hr e Mh: essa ocorrência provavelmente deve-se ao espaço para sua cristalização. (B) detalhe dos Pr, gerados durante o processo de martitização e com processo de hidratação associado.

VII.2.1.1.3 – Hematita

As hematitas estudadas apresentam diferentes graus de cristalizações, indicando, assim, diferentes fases de cristalizações, como pode ser observado na FIGURA 58.

Dentre os tipos de *sinter feed* estudados, pode-se separar em três tipos básicos, com pequenas variações em cada tipo de minério, principalmente, em relação ao tamanho dos cristais e o grau de cristalinidade. Os três tipos básicos são: Hematita Microcristalina (Hm); Hematita Granular (Hr) e Hematita Lamelar (HI) (GRÁFICOS 18 e 19).

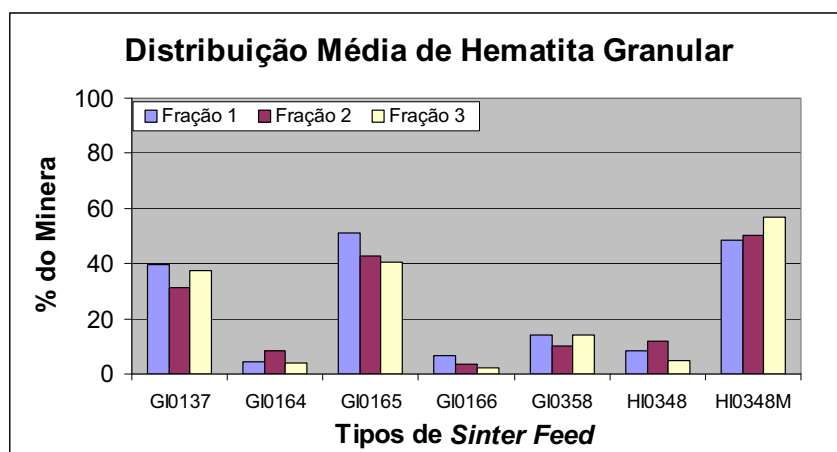


GRÁFICO 18 – Distribuição Média de Hr nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

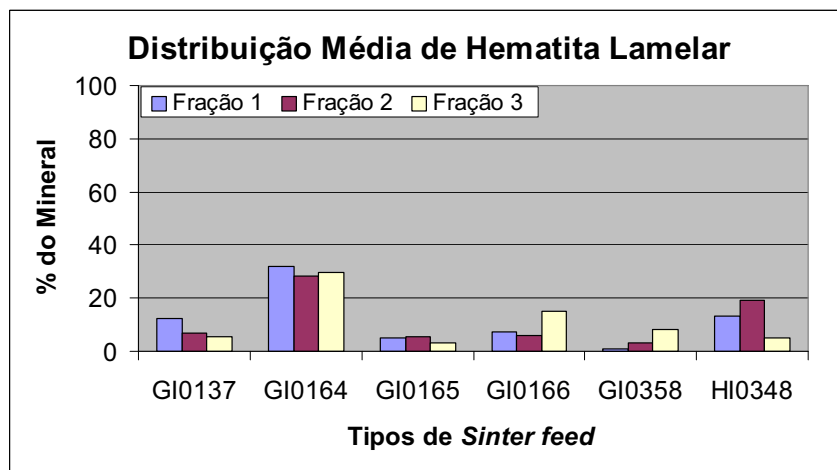


GRÁFICO 19 – Distribuição Média de HI nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

As Hm apresentam o menor grau de cristalização, dentre os três tipos encontrados, apenas no minério HI 0348 (GRÁFICO 18). Apresenta-se como cristais muito pequenos, não sendo facilmente distinguíveis em microscópio ótico. Nesse minério, ocorre uma gradação de cristais microcristalinos a granulares de granulação fina, melhor observada quando ocorrem bandas intercaladas ou agregados hematíticos microcristalinos ou agregados granulares, gerando estruturas bandadas ou granulares.

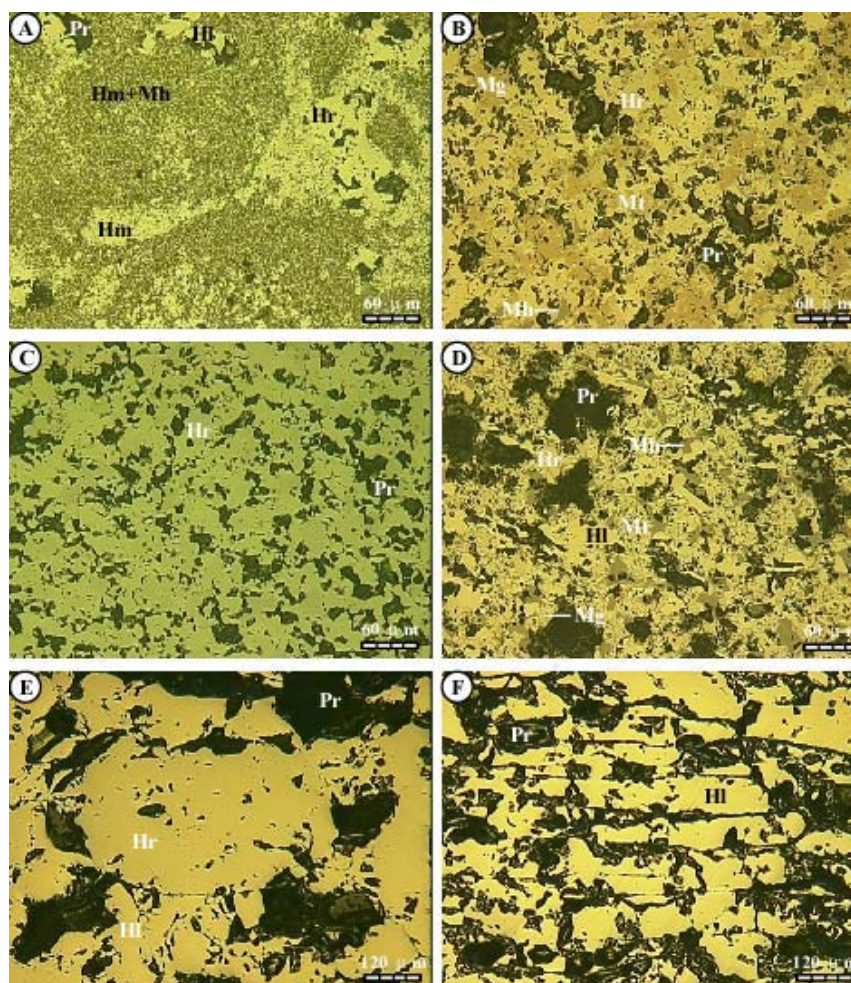


FIGURA 58 – Fotomicrografias com diferentes tipos de Hematita encontrada nos minérios estudados. (A) Porções de Hm com Hm+Mh, com Hr e HI cristalizados nos Pr; (B) Mg martitizada com Hm; (C) Hr com Pr; (D) Mt em treliça com resquícios de Mg, com Mh associado, alguns cristais já transformados para Hr, cortados por HI ligeiramente alinhados; (E) Cristais grandes e granulares de Hr contornados por cristais de HI; e (F) Cristais de HI fortemente alinhados. (Luz Natural).

As Hr ocorrem na maioria dos minérios (GRÁFICO 18), mas apresentam diferenças no tamanho e grau de cristalinidade. No minério GI 0137, basicamente hematítico, essa hematita apresenta-se com granulação fina e contato bastante interdigitado, indicando um baixo grau de cristalização, enquanto que no minério GI0164 (em menor quantidade) e GI 0165, apresentam-se como cristais granulares grandes e contatos irregulares a retos, indicando um grau de cristalização maior.

Nos minérios GI 0166 e GI 0358, as Hr são encontradas como o estágio final do processo de martitização, apresentando um grau de cristalização intermediário, com cristais granulares, superfície lisa e contornos irregulares, sempre associados aos cristais de Mt.

As HI ocorrem em todos os tipos de *sinter feed*, como pode ser observado no GRÁFICO 19, sendo que nos minérios GI 0137, GI 0166 e GI 0358, ocorrem como mineral subordinado, provavelmente, cristalizados posteriormente, visto que são encontrados dispersos ou alinhados, formando uma foliação no minério.

No minério HI 0348, as HI ocorrem cristalizadas dentro de Pr, podem ser aciculares ou tabulares, dificilmente ocorrem dispersas na matriz microcristalina, encontradas também, preenchendo fraturas e nas bandas porosas do bandamento.

Nos minérios GI 0164 e GI 0165, ocorrem como cristais grandes, bem cristalizados, de contornos bem definidos e fortemente orientados no minério GI 0164, indicando terem sido formados em ambientes de alta deformação e metamorfismo.

VII.2.1.1.4 – Mineral Hidratado

O Mh pode ser encontrado em todos os tipos de *sinter feed*. No entanto, apresenta maior concentração nos minérios GI 0166, GI 0358 e HI 0348 (GRÁFICO 20), sendo que nos demais minérios apresenta-se como traço ou quase inexistente. Na FIGURA 59 e 60, pode-se observar algumas formas de ocorrências deste mineral.

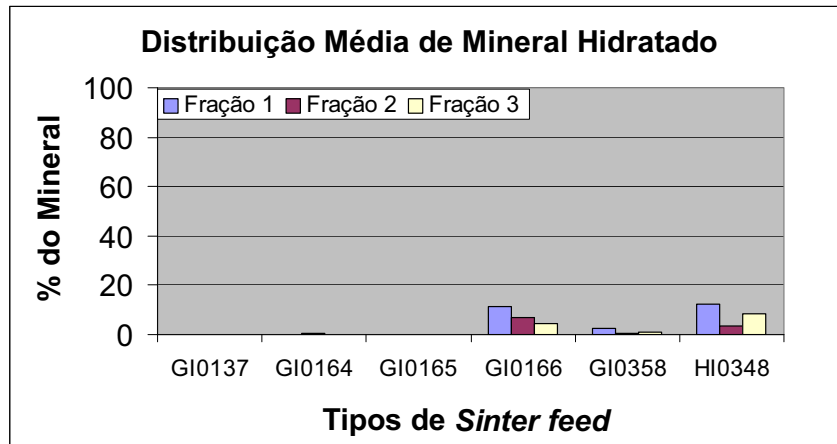


GRÁFICO 20 – Distribuição Média de Mh nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

O Mh no minério GI 0166, apresenta-se ora como matriz, ora como mineral subordinado. Como matriz, é encontrado como uma massa amorfa, envolvendo cristais de outros minerais. Como mineral subordinado, geralmente, está associado à alteração dos cristais de Mt, Mg e Hr.

No minério GI 0358, é encontrado como produto de hidratação da Mg, geralmente, associado ao processo de martitização.

E, no minério HI 0348, ocorre formando uma matriz microcristalina hidratada, ou seja, ocorre associado e subordinado à matriz microcristalina.

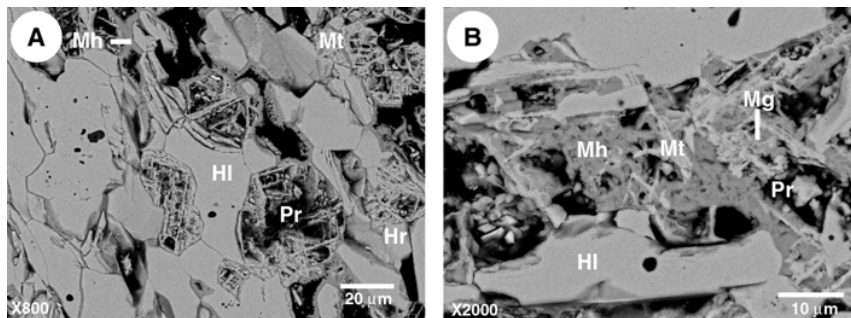


FIGURA 59 – Imagens de BSE obtidas no MEV evidenciando o processo de hidratação. Na Imagem (A), o processo de transformação secundária da Mt, que já é produto de alteração da Mg, gera Mh (canto superior, à esquerda) ou Mh + Pr (canto inferior à direita); a forma de treliça é dada pela Mt substituindo os planos cristalográficos da Mg. Na imagem (B), tem-se o detalhe das formas de ocorrência de Mh.

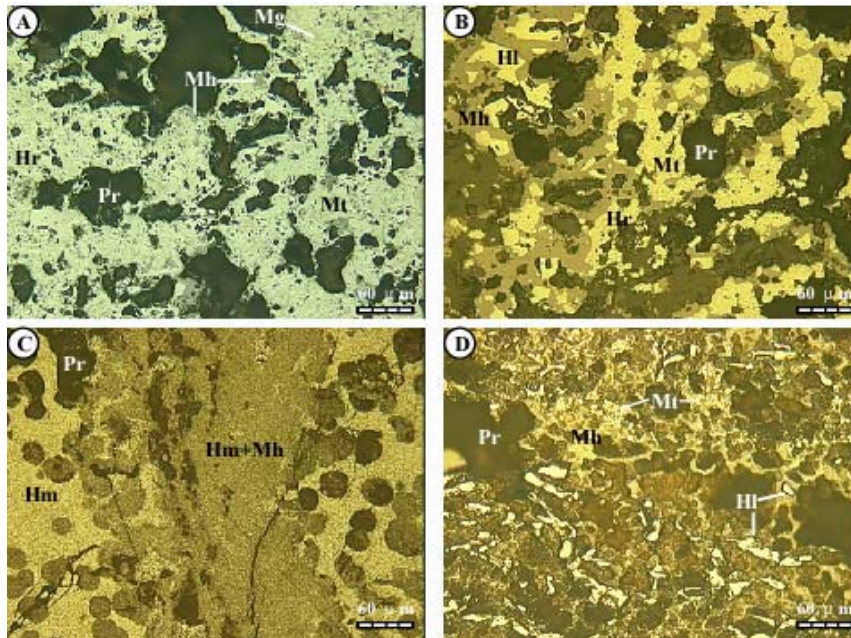


FIGURA 60 – Fotomicrografias com tipos diferentes de ocorrências de Mh, gerados devido ao processo de hidratação nos diferentes minérios. (A) O Mh produzido da Mt, ocorre de forma incipiente; (B) O Mh ocorre de forma mais expressiva; (C) O Mh ocorre associado à Hm; (D) Neste estágio, o Mh ocorre como uma matriz envolvendo os cristais de Mt e Hl. Luz Natural.

VII.2.1.1.5 – Poros

As subfrações nucleantes destes minérios apresentam-se como partículas primárias, relativamente porosas como pode ser observado pelo GRÁFICO 21. No entanto, pode-se observar que os tipos de *sinter feed* que apresentam os mais baixos graus de deformações (HI 0348 e GI 0358) têm uma densidade menor de Pr. Enquanto que, o minério que apresenta o mais alto grau de deformação GI 0164, apresenta maior densidade de Pr, cujos Pr podem ter sido gerados pela facilidade de desagregação dos cristais. Os minérios intermediários apresentam uma porosidade média alta a média baixa. O minério GI 0166 apresenta uma densidade de Pr média alta, provavelmente, devido ao grau de hidratação de seu minério, o que permitiu uma lixiviação dos minerais de ganga, formando-se assim maior quantidade de Pr.

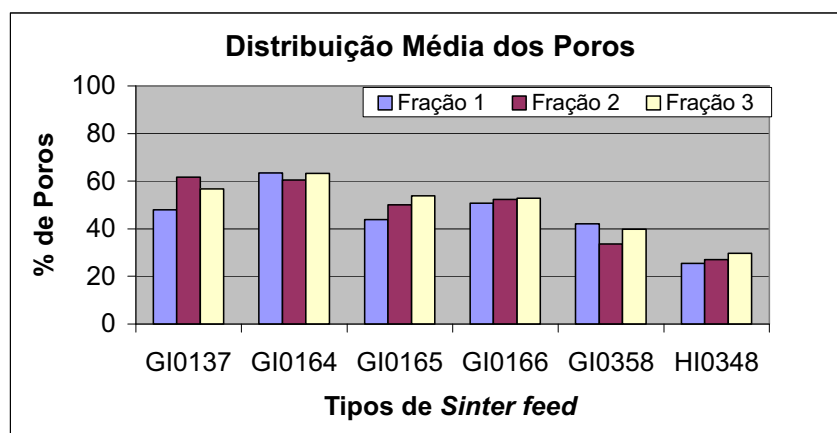


GRÁFICO 21 – Distribuição Média de Pr nas subfrações nucleantes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

VII.2.1.2 – Textura dos Minérios

A textura do minério está intimamente associada à mineralogia apresentada e à forma de ocorrência de seus cristais, resultado do grau de deformação sofrido pelo minério durante a sua formação.

A textura apresentada pelas partículas primárias depende do arranjo interno dos minerais presentes, pois quando os cristais de minerais são granulares e ocorrem como agregados granulares, apresentam uma textura granular. Enquanto que, quando tendem a apresentar minerais definindo uma orientação, apresentam uma textura lamelar. Na TABELA 43, é apresentada na forma resumida a textura dos minérios.

As imagens de elétrons secundários das partículas primárias de minérios obtidos no microscópio eletrônico de varredura (MEV) (FIGURA 61) mostram de uma forma mais clara as características de cada textura dos diferentes tipos de minérios.

Tipo <i>Sinter feed</i>	Textura
GI 0137	Granular
GI 0164	Lamelar a Granular
GI 0165	Granular a Lamelar
GI 0166	Granular a Lamelar
GI 0358	Granular
HI 0348	Microcristalino a Amorfo

TABELA 43 – Tabela com as texturas predominantes das subfrações nucleantes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

VII.2.1.3 – Forma das partículas primárias e das Subfrações Nucleantes

A TABELA 44 apresenta o resumo das características principais apresentadas pelos diferentes tipos de minérios.

O grau de alongação das partículas primárias nas subfrações nucleantes dos tipos de *sinter feed* estudados variam de subgranular a alongadas (TABELA 44 e FIGURA 62).

Tipo <i>Sinter feed</i>	Grau de Elongação	Grau de Arredondamento	Superfície de Contorno
GI 0137	1,84	Arredondado a Subanguloso	Irregular
GI 0164	2.05	Arredondado a Subanguloso	Reto a Irregular
GI 0165	1.91	Subarredondado a Subanguloso	Reto a Irregular
GI 0166	2.18	Subarredondado a Subanguloso	Irregular a Reto
GI 0358	1.53	Arredondado a Subanguloso	Irregular a Reto
HI 0348	1.85	Anguloso a Arredondado	Irregular a Reto

TABELA 44 – Tabela com as principais características das formas das partículas primárias das subfrações nucleantes nos diferentes tipos de *Sinter feed*.

O grau de alongação das partículas primárias de minérios indica serem reflexos das características internas apresentadas por cada tipo de minério. A presença de cristais de HI está associada ao tipo de ambiente, a intensidade da pressão e ao grau da temperatura a que a rocha foi submetida durante sua formação. Geralmente, este mineral representa um estágio de cristalização mais avançado no minério, pois apresenta grau de cristalinidade maior.

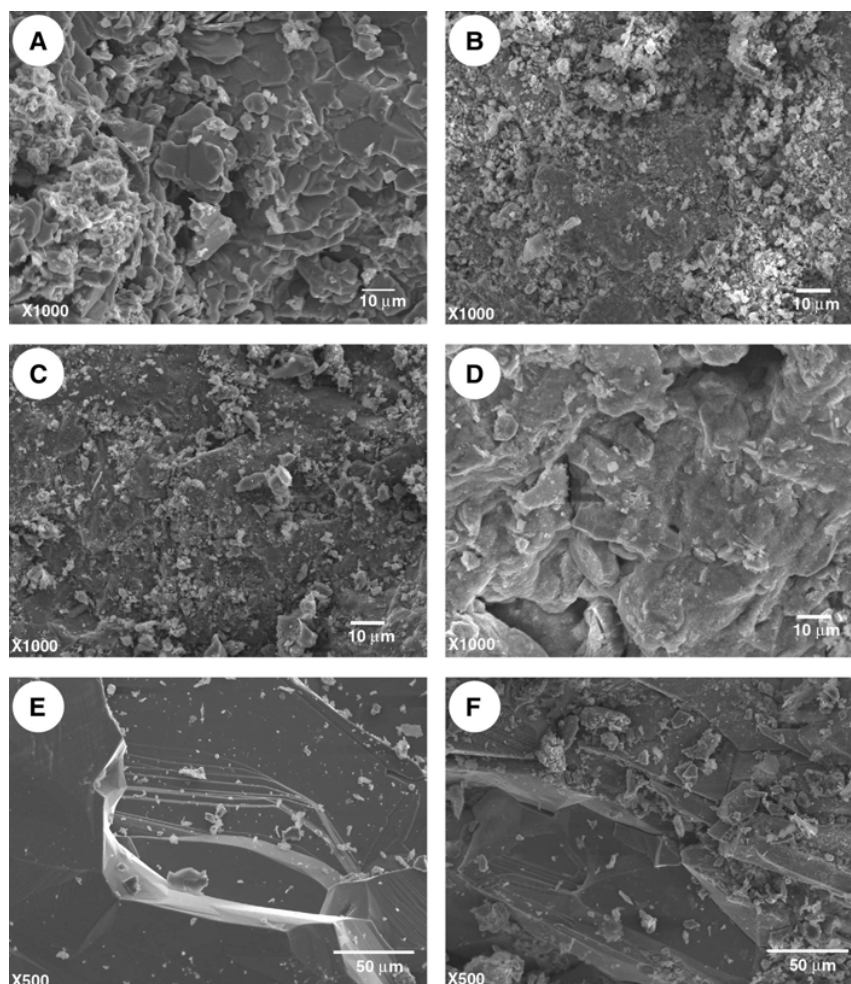


FIGURA 61 – As imagens (A), (B), (C) e (D) apresentam texturas granulares dos seguintes minérios: GI 0137, HI 0348, GI 0358 e GI 0166, respectivamente. A imagem (E) é de um minério com textura lamelar (GI 0164) e a imagem (F) é de um minério com textura lamelar a granular (GI 0165).

Os minérios que apresentam maior quantidade de cristais de HI, quando submetidos a uma deformação tendem a se alinharem, gerando uma foliação, que pode gerar bandamento ou não; isto dependerá do grau de

deformação sofrido pela rocha. Quando é gerado um bandamento, as partículas primárias do minério tendem a apresentarem-se mais alongadas.



FIGURA 62 – Ilustração esquemática da forma dos cristais de minerais de ferro, de acordo com o grau de alongação médio, das subfrações nucleantes dos diferentes tipos de minérios.

Como pode ser visto, o *sinter feed* menos alongado é o do minério GI 0358, que apresenta uma menor quantidade do mineral HI e não apresenta bandamento interno. E o tipo mais alongado, o minério GI 0166, além de apresentar uma quantidade significativa de HI, é também um minério bastante bandado. O bandamento seria uma zona de menor resistência do minério, tornando-se uma zona de fraqueza, facilitando a quebra das partículas primárias do minério de forma tabular, gerando assim, partículas primárias com forma mais alongada.

Os demais minérios apresentam grau de alongação intermediária, são subarredondados a alongados; devido a presença de bandamento ou pela presença de HI alinhadas, que definem uma foliação.

O grau de arredondamento das partículas primárias é reflexo do arranjo dos minerais presentes, principalmente em relação à distribuição dos Pr, ao grau de porosidade e ao bandamento presente (TABELA 44).

As partículas primárias bastante porosas apresentam-se com bordas mais arredondadas, enquanto que partículas primárias mais compactas ou bandadas tendem a apresentar suas bordas mais angulosas.

As partículas primárias bandadas tendem a quebrar paralelamente ao bandamento, gerando partículas primárias mais alongadas e com bordas mais angulosas.

O contorno externo das partículas primárias depende do tamanho e do arranjo dos cristais de minerais e também do seu grau de porosidade. Através das imagens de MEV das partículas primárias estudadas, constata-se algumas diferenças entre os diferentes tipos de minérios. As diferenças estão associadas

principalmente, com as características citadas, que são responsáveis pela geração da rugosidade de cada superfície (FIGURA 63 e TABELA 44).

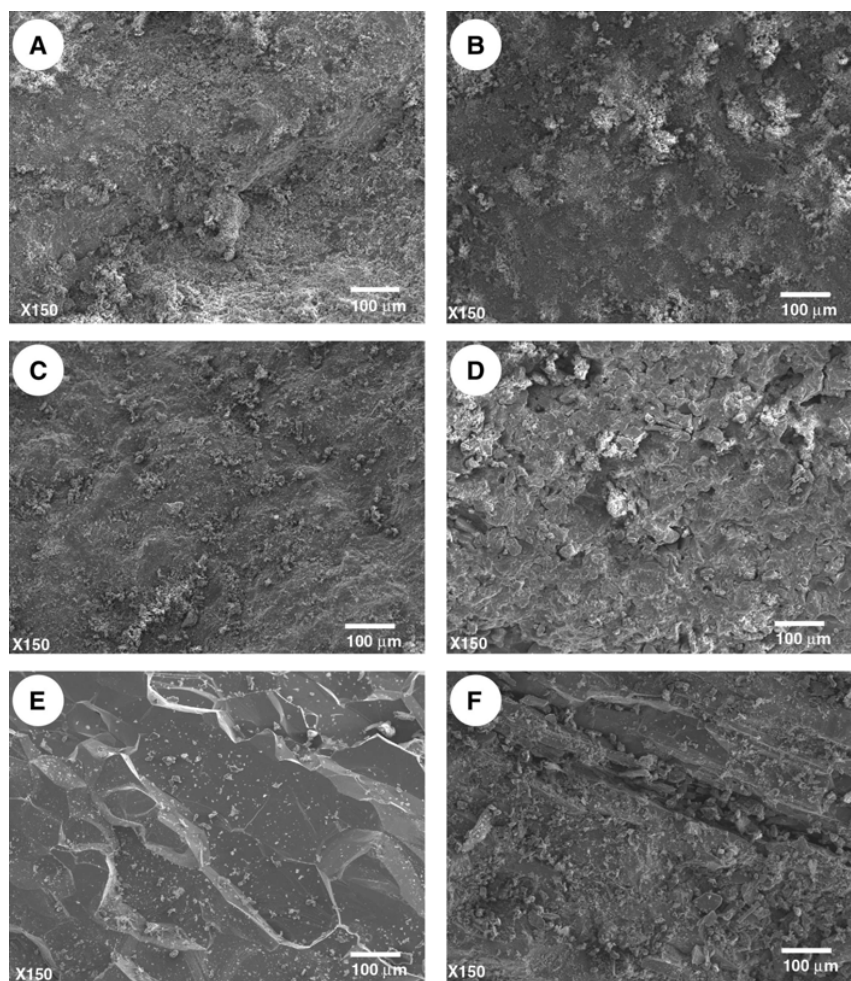


FIGURA 63 – As imagens (A), (B), (C), (D), (E) e (F) – minérios, GI 0137, HI 0348, GI 0358, GI 0166, GI 0164 e GI 0165, respectivamente.

Nas imagens de SE obtidas no MEV, além de apresentar os diferentes tipos de superfície de contorno de cada tipo de minério, pode ser observado ainda o recobrimento desta superfície por partículas primárias mais finas do mesmo minério (essas partículas mais finas são responsáveis pelo carregamento de elétrons em algumas imagens, em alguns minérios não foi possível a aquisição de imagem de melhor qualidade).

Na FIGURA 63, observa-se que as partículas primárias bastante porosas apresentam sua superfície de contorno externo mais irregular, cheio de

reentrâncias, gerando uma superfície bastante rugosa FIGURA 63 (A-D). As partículas primárias mais compactas apresentam superfície mais lisa FIGURA 63 (E). Os minérios que apresentam granulação mais fina têm maiores quantidades de finos aderidos à sua superfície FIGURA 63 (A, B, e C).

VII.2.2 – SUBFRAÇÕES ADERENTES

As subfrações aderentes dos tipos de *sinter feed* estudados são formadas por pequenas partículas primárias (agregados de minerais) ou por cristais de minerais isolados (FIGURAS 64 e 65).

A presença de cristais isolados indica o grau de liberação dos minerais integrantes da composição de cada minério. A maior ou menor presença de cristais isolados de minerais nos minérios pode estar associada à forma, ao arranjo e também ao tamanho dos minerais presentes.

Na subfração aderente 6, os minérios GI 0137, GI 0358 e HI 0348 são os que têm maior quantidade de agregados de minerais e mineralogia mais homogênea. No minério GI 0166 há uma distribuição equilibrada entre agregados de minerais e cristais isolados de minerais, com pequena predominância de agregados. Enquanto que os minérios GI 0164 e GI 0165 têm maior quantidade de cristais isolados.

Observa-se que os minérios com superfície de contato rugosa (irregular) e cristais pequenos, apresentam maior quantidade de agregados de minerais, tipo os minérios GI 0137, GI 0358 e HI 0348; enquanto que os minérios com superfície de contato lisa e cristais maiores apresentam maior quantidade de cristais isolados de minerais. O minério GI 0166 apresenta um comportamento diferenciado, pois, além de apresentar uma mineralogia bastante diversificada,

apresenta também minerais com diversos tamanhos de cristais, além da presença do Mh que ocorre agregando minerais.

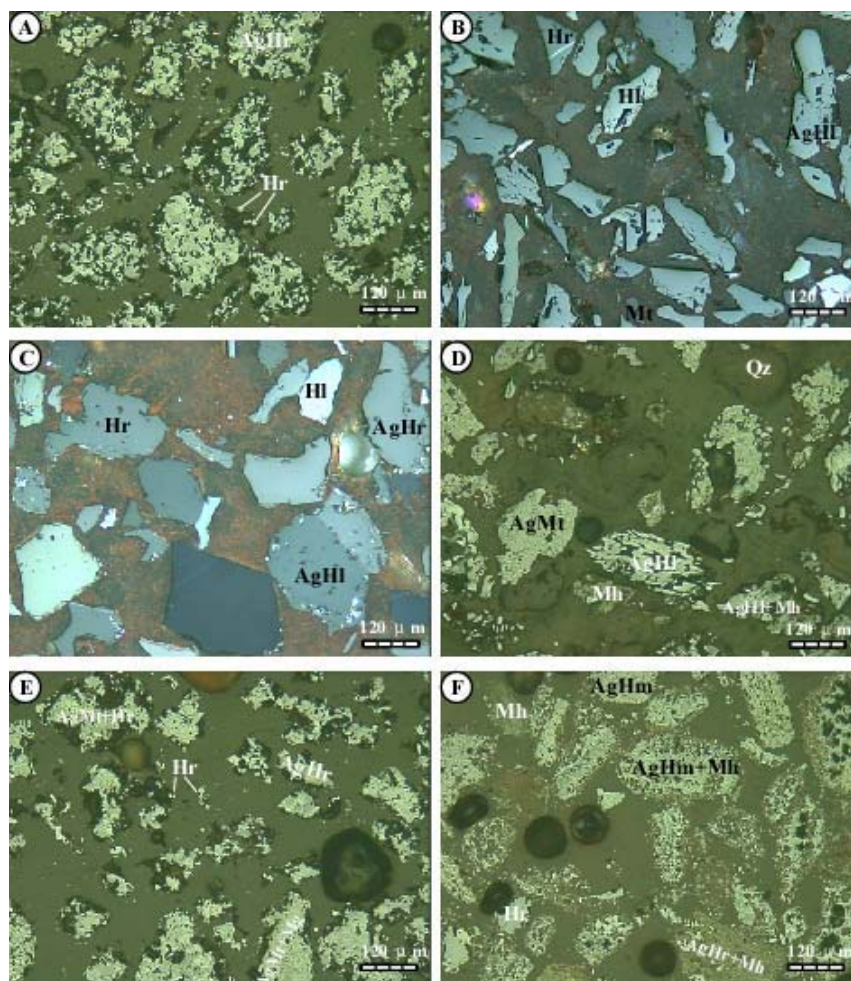


FIGURA 64 – Fotomicrografias de luz polarizada da subfração 6 dos diferentes tipos de minérios: (A) GI 0137; (B) GI 0164; (C) GI 0165; (D) GI 0166; (E) GI 0358; (F) HI 0348.

Na subfração aderente 7 (FIGURA 65), tem-se uma grande diminuição na quantidade de agregados de minerais em todos os minérios. Os agregados de minerais podem não ser encontrados, como no minério GI 0165, ou encontra-se de forma incipiente, como no minério GI 0164. Nos minérios GI 0137 e HI 0348, apresentaram uma relação inversa ao apresentado pela subfração aderente 6, com menor proporção de agregados de minerais. O minério GI 0166 apresenta um aumento na quantidade de cristais isolados em relação a sua subfração aderente 6. Enquanto que o minério GI 0358 apresenta proporções

semelhantes de cristais isolados e agregados de minerais, com uma ligeira predominância do primeiro.

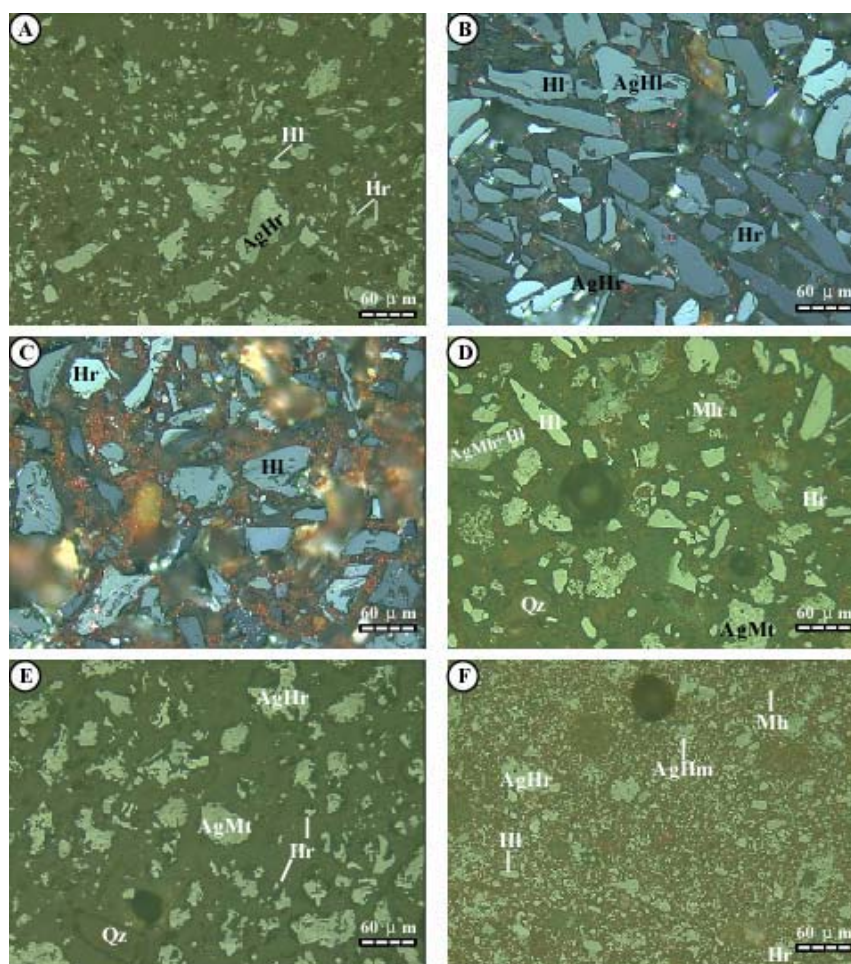


FIGURA 65 – Fotomicrografias de luz polarizada da subfração 7 dos diferentes tipos de minérios: (A) GI 0137; (B) GI 0164; (C) GI 0165; (D) GI 0166; (E) GI 0358; (F) HI 0348.

VII.2.2.1 – Mineralogia

A mineralogia dos minérios das subfrações aderentes é bastante similar à das subfrações nucleantes. Então, aqui será apresentada a distribuição dos diferentes tipos de minerais em cada tipo de minério.

A maioria dos minerais, nas subfrações aderentes, tem uma distribuição maior que as subfrações nucleantes, provavelmente devido à menor quantidade de Pr, presentes nessas subfrações mais finas. Os Pr maiores nessas subfrações encontram-se rompidos, restando apenas os Pr menores dentro das pequenas partículas primárias presentes. Essa diferenciação pode ser melhor observada, quando comparadas à quantidade de Pr das subfrações nucleantes (GRÁFICO 21) com o grau de liberação cristalina e porosidade das subfrações aderentes (GRÁFICO 29 e 30).

VII.2.2.1.1 – Magnetita

A Mg é encontrada nos minérios GI 0166 e GI 0358 (GRÁFICO 22). Nessas subfrações mais finas, esse mineral não foi encontrado nos minérios GI 0164 e GI 0165 e presente em menor quantidade no minério GI 0166.

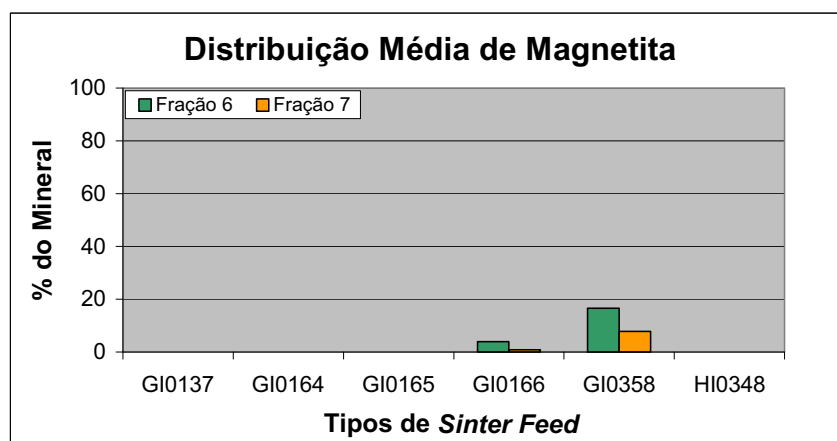


GRÁFICO 22 – Distribuição Média de Mg nas diferentes subfrações aderentes de *sinter feed*.

VII.2.2.1.2 – *Martita*

O mineral Mt está presente nos minérios GI 0165, GI 0166 e GI 0358 (GRÁFICO 23). Nesses minérios, esse mineral é encontrado em maior proporção que nas subfrações nucleantes. No entanto, o minério GI 0164 não apresenta a Mt nas suas subfrações mais finas.

VII.2.2.1.3 – *Hematita*

A hematita é o mineral predominante, sendo encontrado em todos os minérios. Esse mineral pode ser encontrado em três tipos de texturas diferentes: granular, lamelar e microcristalina (GRÁFICOS 24 e 25). Esta última é encontrada apenas no minério HI 0348, apresentada no gráfico da Hr como HI0348M. A Hm é Hr de granulação muito fina, como pode ser observado no minério HI 0348; nesse minério também é encontrado a Hr, na forma de agregados granulares dispersos na matriz composta de Hm.

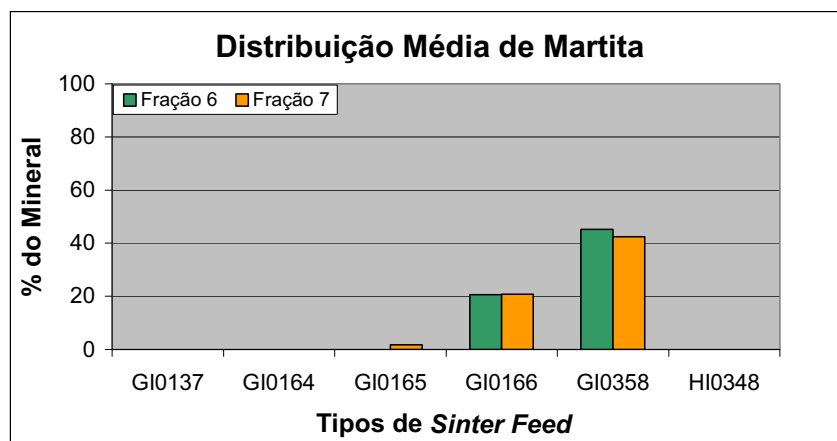


GRÁFICO 23 – Distribuição Média de Mt nas diferentes subfrações aderentes de *sinter feed*.

No GRÁFICO 24, observa-se que nessas subfrações mais finas houve um aumento na quantidade de hematita em relação às subfrações nucleantes nos minérios, exceto para a Hr do minério HI 0348.

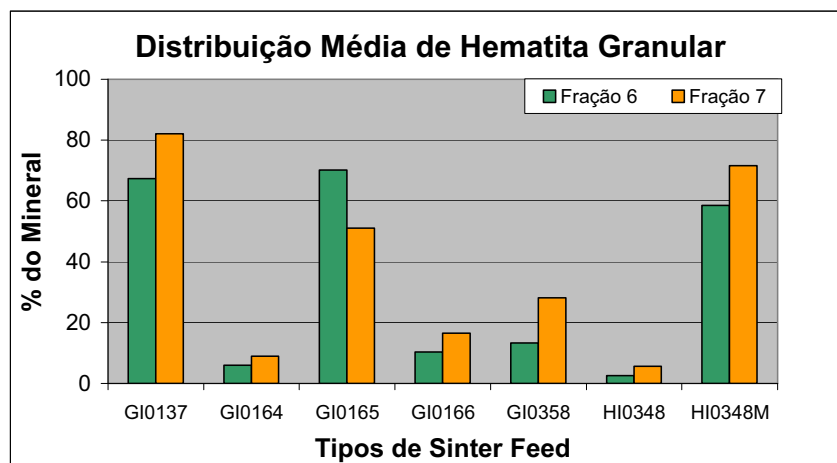


GRÁFICO 24 – Distribuição Média de Hr nas diferentes subfrações aderentes de *sinter feed*.

Pode-se observar também que, nas subfrações aderentes, a presença de HI (GRÁFICO 25) é muito maior que nas subfrações nucleantes nos minérios GI 0164, GI 0165 e GI 0166. No entanto, nos minérios GI 0137, GI 0358 e HI 0348, o mineral HI é menor nas subfrações aderentes que nas subfrações nucleantes. Essa menor quantidade de HI, nesses últimos minérios, deve-se pela sua forma de ocorrência da HI, onde esse mineral ficaria retido nas frações mais grossas.

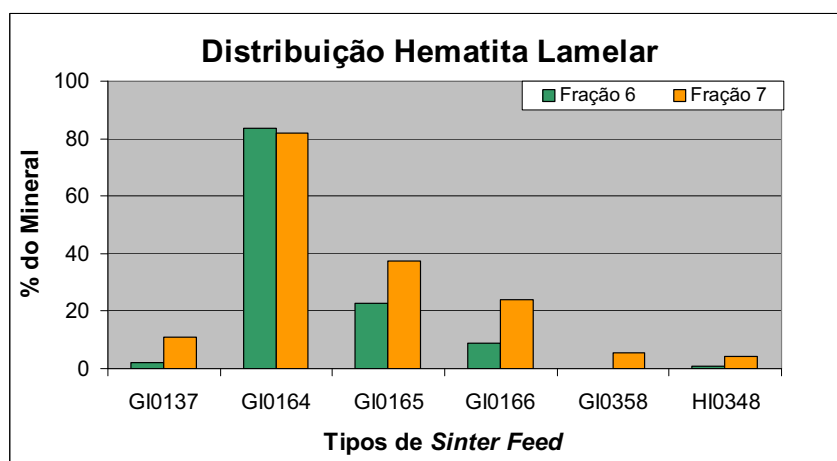


GRÁFICO 25 – Distribuição Média de HI nas subfrações aderentes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

VII.2.2.1.4 – Mineral Hidratado

O Mh é encontrado nos minérios GI 0166, GI 0358 e HI 0348 (GRÁFICO 26). Nesses minérios, a sua concentração é maior que nas subfrações nucleantes. Esta presença maior nas subfrações aderentes deve-se a sua forma de ocorrência que é amorfa: pode estar agregando cristais de hematitas ou também estar preenchendo Pr. Nos minérios GI 0166 e GI 0358, este mineral ocorre, geralmente, associado à transformação da Mg para Mt com processo de hidratação associado.

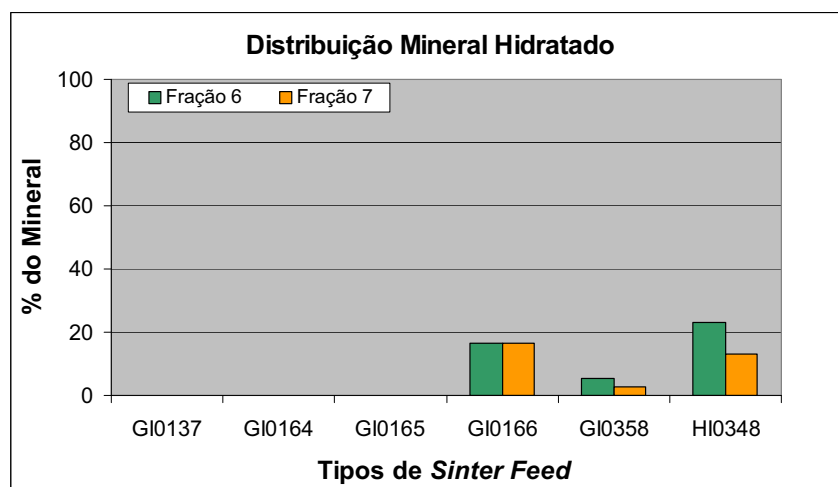


GRÁFICO 26 – Distribuição Média de Mh nas subfrações aderentes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

VII.2.2.1.5 – Quartzo

Nas subfrações aderentes, a presença de Qz ocorre de forma significativa, provavelmente, devido ao tamanho dos cristais estarem dentro dessas subfrações mais finas. O caso mais interessante é a quantidade de Qz na subfração aderente 6 do minério GI 0166, que chega a ter mais de 20 % desse mineral (GRÁFICO 27). Essa anomalia deve-se ao fato acima mencionado, ou seja, a granulação dos cristais de Qz deste minério encontra-se dentro desta faixa granulométrica. No minério GI 0358, a sua presença é insignificativa.

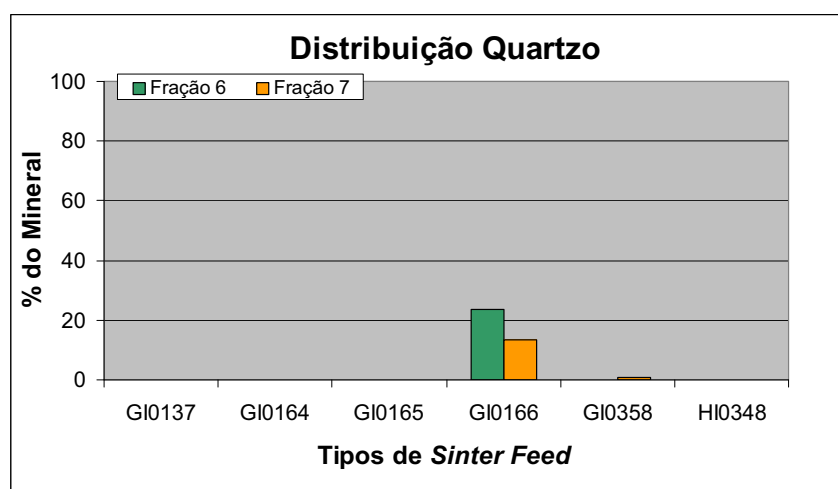


GRÁFICO 27 – Distribuição Média de Qz nas subfrações aderentes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

A forma de ocorrência do Qz é importante para o balanço de massa da carga, visto que sua quantidade influencia na basicidade da mistura a ser sinterizada.

VII.2.2.1.6 – Poros

Os Pr das subfrações aderentes dos diferentes tipos de minérios são bem menores e em menor quantidade que das subfrações nucleantes (GRÁFICO 28). Isso deve-se, provavelmente, ao fato de que os Pr maiores serviram de zonas de menor resistência durante a fragmentação do minério, tornando-se regiões

preferenciais de quebra. Os Pr maiores, nessas subfrações menores, passam a ser superfícies de contornos das partículas primárias.

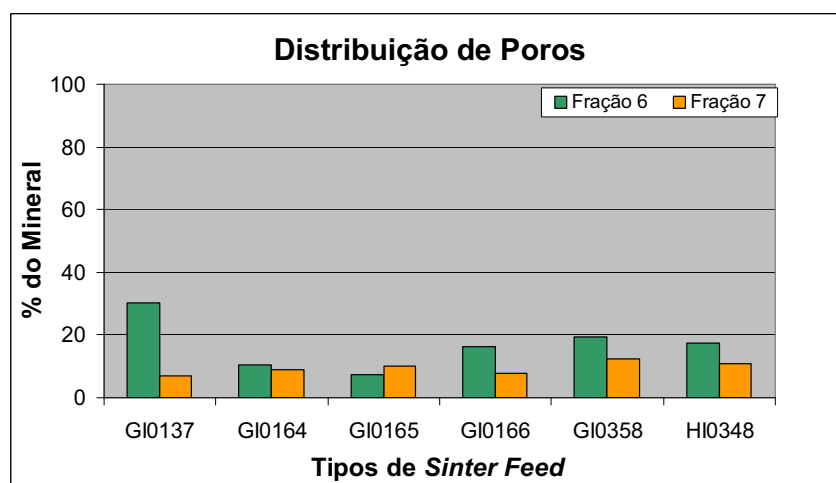


GRÁFICO 28 – Distribuição Média de Pr nas diferentes subfrações aderentes de *sinter feed*.

Os Pr das subfrações mais finas são os encontrados entre minerais e dentro dos minerais, sendo, portanto, pequenos.

VII.2.2.2 – Textura dos Minérios

As texturas dos minérios nas subfrações aderentes são semelhantes às subfrações nucleantes. No entanto, devido à maior contribuição dos cristais isolados de minerais, a textura fica restrita às pequenas partículas primárias presentes; apesar disso, pode-se identificá-las, como dito acima: são as mesmas das subfrações nucleantes, o que era esperado. Na TABELA 45 abaixo, pode-se observar que apresentam praticamente a mesma textura apresentada pela subfração nucleante.

Tipo <i>Sinter feed</i>	Textura
GI 0137	Granular
GI 0164	Lamelar
GI 0165	Granular a Lamelar
GI 0166	Granular a Lamelar
GI 0358	Granular
HI 0348	Granular a lamelar

TABELA 45 – Tabela com as texturas predominantes das subfrações aderentes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

VII.2.2.3 – Forma dos partículas primárias das Subfrações Aderentes

As subfrações aderentes dos minérios apresentam cristais isolados e agregados de minerais que dão forma às pequenas partículas primárias. Assim, a forma dessas partículas está associada à forma do mineral, como no caso dos minérios GI 0164 e GI 0165, visto pela grande quantidade de cristais isolados.

As diferenças marcantes na forma das partículas primárias dessas subfrações, evidencia o comportamento diferenciado durante o processo de preparação, micropelotização e sinterização dos minérios, conforme serão descritos nos próximos capítulos.

As partículas primárias das subfrações aderentes apresentam a forma e o tamanho médio diferenciado (FIGURA 66); portanto, é de se esperar que apresentem comportamentos diferenciados.

Observa-se que nos minérios, onde houve uma diminuição no valor do grau de alongação das subfrações nucleantes para aderentes, é devido à maior presença de minerais ou pequenos agregados mais granulares; enquanto que, nos minérios onde houve aumento, ocorre maior presença de cristais isolados de HI (TABELA 46).

Essa variação nos valores do grau de alongação das subfrações aderentes, em relação aos valores das subfrações nucleantes, deve-se à forma de desagregação do minério à medida que o mesmo é cominuído. Onde, os minérios com minerais mais granulares tendem a fragmentar-se de forma mais granular, diminuindo o grau de alongação dos minérios. As exceções são o minério GI 0164, seguido do GI 0165, em que o aumento do grau de alongação deve-se à maior contribuição dos minerais isolados de HI.



FIGURA 66 – Ilustração do formato dos cristais e agregados de minerais de ferro nas subfrações aderentes, de acordo com o seu grau de alongação médio (sem escala).

Nessas subfrações, devido à granulometria do minério, o bandamento e a foliação não influenciam neste parâmetro. O minério GI 0166 apresenta uma diminuição significativa no seu grau de alongação, passando de alongado a quase subgranular, isso deve-se à maior participação dos minerais liberados encontrados. O mesmo pode se dizer dos tipos GI 0137, GI 0358 e HI 0348.

O grau de liberação é dado pela presença de cristais isolados em cada minério; os minérios estudados apresentam diferentes graus de liberação (TABELA 46 e GRÁFICOS 29 e 30).

Tipos <i>Sinter feed</i>	Alongação	Grau de Liberação	
		Cristal (%)	Agregado (%)
GI 0137	1.72	55.50	44.16
GI 0164	2.5	91.50	8.50
GI 0165	2.01	95.16	4.84
GI 0166	1.76	58.33	41.67
GI 0358	1.36	32.84	67.16
HI 0348	1.69	52.33	47.67

TABELA 46 – Principais características das formas das partículas primárias das subfrações aderentes dos diferentes tipos de *sinter feed*.

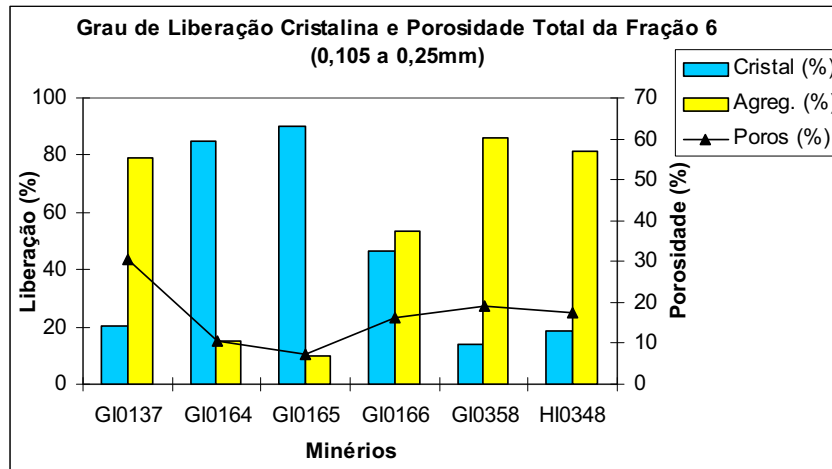


GRÁFICO 29 – Grau de liberação cristalina e a porosidade da subfração aderente 6.

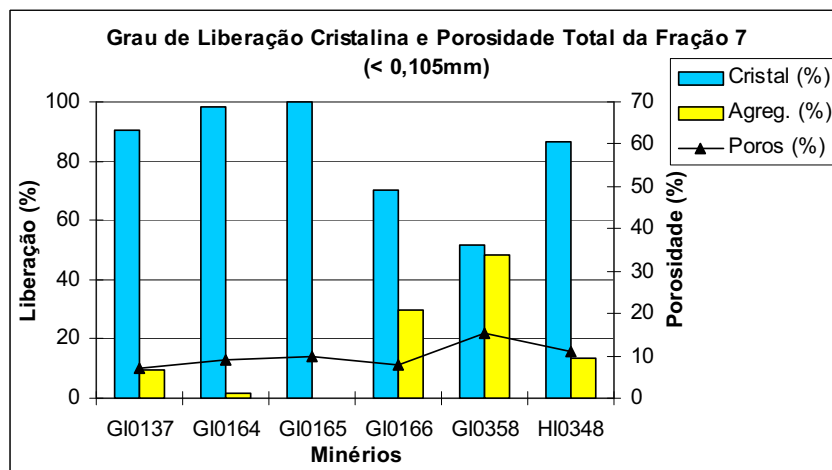


GRÁFICO 30 – Grau de liberação cristalina e a porosidade da subfração aderente 7.

A quantidade de cristais liberados depende da relação existente entre os cristais: tipo de superfícies de contatos; tamanho dos cristais e grau de coesão dos minerais. Observa-se na TABELA 46 que os minérios GI 0164 e GI 0165 são os minérios que apresentam maior quantidade de cristais liberados, provavelmente, devido ao grau de cristalização maior de seus cristais, ou seja, foram formados sob um grau de deformação maior, gerando cristais grandes com superfície de contorno lisa (bem definida) entre os cristais, apresentando assim um grau de coesão menor.

O minério GI 0358 apresenta a menor quantidade de cristais isolados, provavelmente, devido à sua mineralogia, representada basicamente por Hr, Mt e Mg, em algumas partículas primárias encontram-se associadas a Mh. Esses minerais apresentam superfícies de contatos irregulares, geralmente, na forma de pequenos agregados de minerais compostos por Hr/Mt com Mg e/ou Mh. O HI ocorre de forma incipiente compondo os pequenos agregados ou como cristais isolados.

Os demais minérios apresentam a mesma proporção de cristais isolados e agregados de minerais: são os minérios que apresentam grau de deformação intermediária entre os dois extremos acima citados.

A correlação entre os Pr e a quantidade de agregados presentes em cada minério é uma relação direta, pois, no caso das subfrações aderentes dos minérios, há maior participação dos Pr entre os cristais (GRÁFICOS 29 e 30). Os Pr, portanto, são pequenos em relação aos agregados das subfrações nucleantes. Enquanto que, os minérios com maior contribuição dos cristais isolados, também podem apresentar uma certa porosidade, como no caso do minério GI 0164, onde há presença de Pr dentro dos cristais de HI (FIGURA 67).

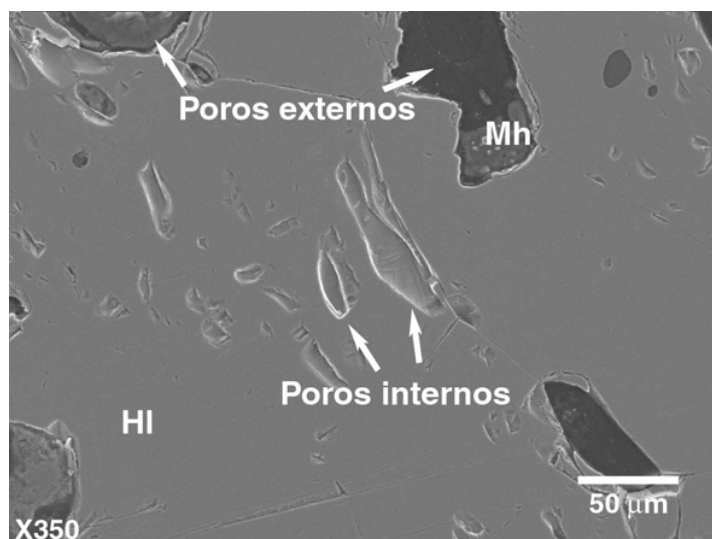


FIGURA 67 – Imagem de elétrons secundários obtidos no MEV, mostrando os cristais de hematitas lamelares com Pr internos.

De acordo com as características internas e externas observadas das partículas primárias das subfrações aderentes (FIGURA 59 e 60), foi possível

fazer as classificações, com relação à textura, grau de arredondamento e superfície de contorno, apresentadas na TABELA 47 abaixo. Observa-se que os minérios com menor deformação apresentam cristais menores e com contatos mais irregulares, o que faz com que esses minérios apresentem texturas mais granulares e grau de arredondamento maior (FIGURA 66).

Tipo Sinter feed	Textura	Grau de Arredondamento	Superfície de Contorno
GI 0137	Granular	Subarredondado	Irregular
GI 0164	Lamelar a Granular	Subanguloso a Subarredondado	Reto a Irregular
GI 0165	Granular a Lamelar	Subanguloso a Subarredondado	Reto a Irregular
GI 0166	Granular a Lamelar	Subarredondado a Subanguloso	Irregular a Reto
GI 0358	Granular	Subarredondado	Irregular
HI 0348	Microcristalino a Granular	Subarredondado	Irregular

TABELA 47 – Principais características das partículas primárias das subfrações aderentes dos diferentes tipos de sinter feed estudados.

Nas FIGURAS 68 e 69, observa-se que as superfícies de contorno dos minérios são diferenciadas, dividindo-se em dois grupos: o primeiro, representado por minérios com cristais de granulação mais fina e maior participação de agregados de minerais (GI 0137, HI 0348, GI 0358 e GI 0166); o segundo, por minérios com granulação mais grosseira, com maior presença de cristais isolados (GI 0164 e GI 0165).

No primeiro grupo de minérios, a superfície de contorno dos minérios apresentam-se de rugosa (FIGURAS 68 A a D e 69 A a D), são os minérios com cristais menores e um menor grau de cristalinidade dos minerais. Observa-se que os agregados desses minérios encontram-se recobertos por um material mais fino, podem ser cristais isolados ou agregados de minerais menores, formando uma camada sobre

O segundo grupo é de minérios com superfície de contorno lisa, (FIGURAS 68 E e F e 69 E e F), cujos cristais de minerais são maiores e bem cristalizados. Os minérios deste grupo são compostos basicamente de cristais isolados de hematitas apresentando pouco material mais fino recobrendo sua

superfície; isso ocorre devido ao seu tipo de superfície, que se apresenta lisa e com contornos retos bem definidos.

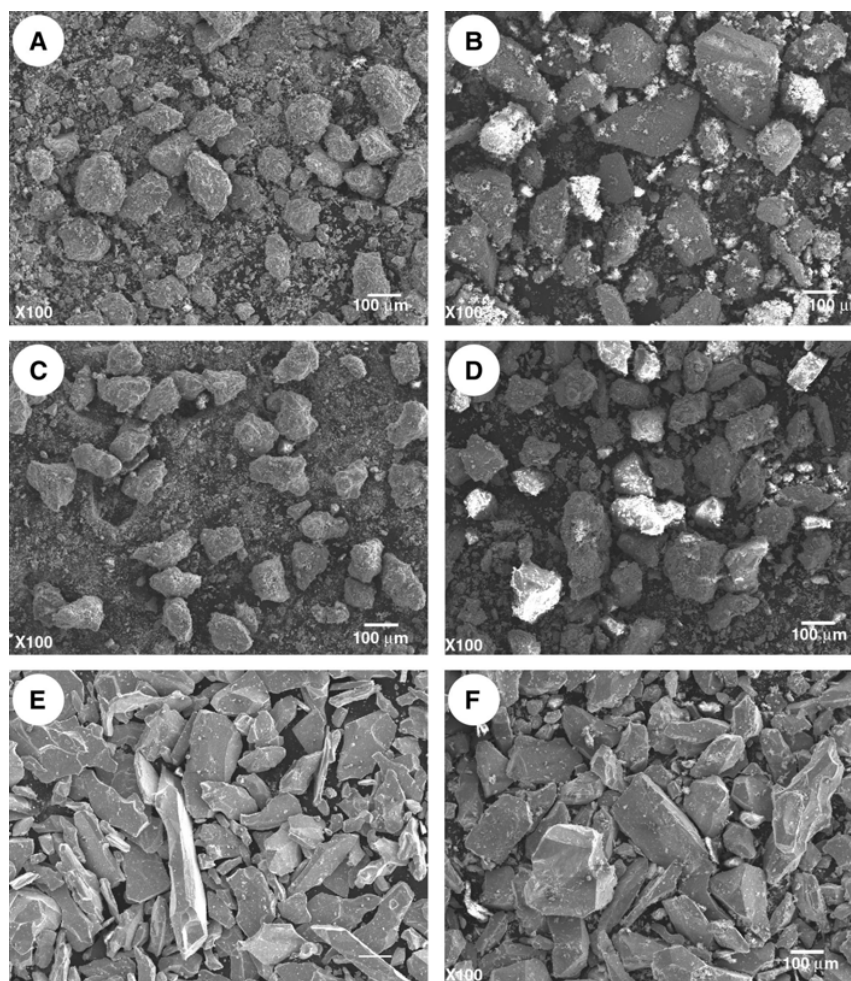


FIGURA 68 – Imagens de elétrons secundários obtidos no MEV. Imagens da superfície de contorno das partículas primárias na subfração aderente 6. As imagens A, B, C e D (minérios, GI 0137, HI 0348, GI 0358 e GI 0166, respectivamente) apresentam superfície mais rugosa e maior quantidade de finos aderidos à sua superfície. GI 0164 (E) apresenta cristais grandes e superfície mais lisa. GI 0165 (F) apresenta também cristais grandes e superfície lisa, é mais granular que o GI 0164. Nestas duas últimas imagens observa-se que não há finos agregados na superfície dessas partículas primárias.

As subfrações aderentes 6 e 7 dos minérios estudados, apresentam superfícies bastante semelhantes, sendo que na subfração 7 há maior contribuição de cristais isolados (GRÁFICOS 29 e 30; FIGURAS 68 e 69).

Apesar de serem representantes de uma faixa granulométrica específica, pode-se observar que os minérios GI 0137 (FIGURA 68A) e GI 0358

(FIGURA 68B) da subfração aderente 6, apresentam partículas primárias maiores e um material mais fino, composto de pequenas partículas primárias e cristais isolados, o que não é observado nos outros minérios, onde os minérios GI 0164 (FIGURA 68E) e GI 0164 (FIGURA 68F) apresentam tamanhos de cristais mais homogêneos.

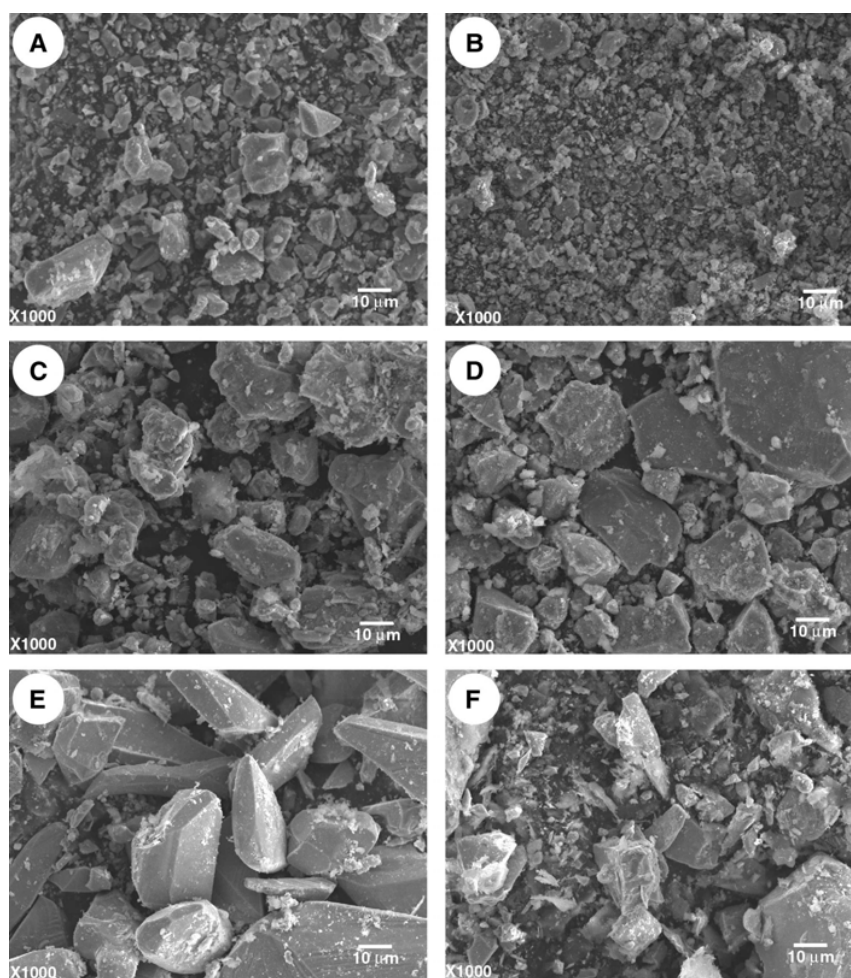


FIGURA 69 – Imagens de elétrons secundários obtidos no MEV. Imagens da superfície de contorno das partículas primárias na subfração aderente 7. As imagens A, B, C e D (minérios, GI 0137, HI 0348, GI 0358 e GI 0166, respectivamente) mostram uma superfície mais rugosa. GI 0164 (E) e GI 0165 (F) apresentam cristais grandes e superfície de contorno mais lisa. Nessas subfrações, há menor quantidade de finos aderidos na superfície de contorno dos agregados e cristais.

Na subfração aderente 7, apenas o minério GI 0164 (FIGURA 69E) apresenta tamanho de cristais homogêneos, enquanto os demais apresentam uma

distribuição granulométrica homogênea dentro da faixa granulométrica desta subfração de *sinter feed*.

VII.3 – Considerações Finais

Neste capítulo, foram colocadas as diferentes caracterizações das cinco subfrações granulométricas estudadas dos diferentes tipos de *sinter feed*. As caracterizações foram feitas observando-se os tipos de minérios, como subfrações nucleantes e aderentes.

Como pode ser visto nesse capítulo, os minérios estudados apresentam características bastante peculiares, sendo possível a sua diferenciação em tipos distintos.

A mineralogia e a forma de ocorrência dos minerais e poros são responsáveis pela geração de texturas diferenciadas nos minérios, que por sua vez reflete na morfologia externa das partículas primárias. Assim, a correlação entre a forma das partículas primárias e a mineralogia e textura dos diferentes tipos de minérios, permite diferenciá-los e classificá-los. Como será visto adiante, as características aqui observadas influenciam nos testes de preparação, microaglomeração, sinterização e de qualidade do sinter gerado.

Assim, as características observadas neste capítulo servirão de base para a interpretação e correlação com os dados obtidos nos processo de sinterização e análises do sinter.

VIII – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados do processo de sinterização, obtidos pelos diferentes tipos de minérios nas suas subfrações nucleantes, intermediárias e aderentes. Os experimentos foram realizados em escala piloto, no Centro de Pesquisas Tecnológicas da Usiminas.

A subfração intermediária não foi caracterizada geologicamente, mas foi submetida aos ensaios de sinterização. Assim, pode-se investigar o comportamento siderúrgico das três subfrações do mesmo minério, permitindo conhecer como as diferentes características mineralógicas, texturais e microestruturais influenciam no processo de sinterização e na qualidade do sinter produto.

Os ensaios de sinterabilidade foram realizados de acordo com o procedimento interno do Laboratório de Sinterização Piloto da Usiminas, descrito no item 1.2 (Metodologia). O único procedimento não adotado refere-se ao sinter retorno, que não foi o produzido pela mistura teste equivalente, mas utilizado o sinter de retorno industrial.

O sinter de retorno industrial foi previamente homogeneizado e caracterizado granulometricamente. A utilização do sinter de retorno industrial almejou reduzir possíveis efeitos adversos da produção piloto de sinter retorno;

permitir um menor consumo dos minérios; tornar a etapa de preparação mais curta e menos extenuante.

As misturas colocadas no misturador, após o misturamento e adição de umidade, formam partículas maiores que são denominadas de quasi-partículas segundo pesquisadores da *Nippon Steel Corp.* no final dos anos 70 (DAWSON, 1993b); no entanto, aqui serão denominadas de micropelotas. A formação dessas micropelotas envolvem o recobrimento das partículas mais grossas (subfrações nucleantes) por partículas mais finas (subfrações aderentes), conforme pode ser observado na FIGURA 30.

As misturas foram amostradas, ainda no misturador, e submetidas aos ensaios de determinação do Índice de Granulação (GI) e distribuição granulométrica das micropelotas, com o objetivo de avaliar as características aglomerantes de cada minério.

O carregamento na panela das micropelotas geradas no misturador foi feito, em todos os casos, utilizando-se do segregador piloto de misturas, para obter um leito mais homogêneo e permeável.

Os sínteres produto de cada situação foram submetidos às caracterizações química, física e metalúrgica, além dos ensaios de RDI, Redutibilidade e Amolecimento e Fusão. A caracterização mineralógica, qualitativa e quantitativa foi também realizada em todos os sínteres produto. Todos os ensaios de caracterização do sinter foram realizados no Centro de Pesquisa Tecnológica da Usiminas.

Inicialmente, será feita a descrição dos resultados do processo de microaglomeração das 19 misturas a sinterizar (TABELA 02), seguida da descrição dos ensaios de sinterização dessas misturas e dos testes de qualidade dos sínteres obtidos. Na TABELA 03, encontra-se a distribuição das faixas granulométricas e sua participação na mistura. A composição química padrão específica para o presente trabalho foi a de obter sínteres que apresentam: $\text{SiO}_2 = 4,90\%$; basicidade = 1,70 e $\text{MgO} = 1,45\%$. Nesse processo, foram utilizadas as proporções e granulações dos insumos apresentadas na TABELA 04 e essas também foram mantidas constantes em todos os níveis de queima.

Na TABELA 03, a subfração nucleante total representa 50 % da mistura, a aderente 35% e a intermediária 15%. Essa distribuição heterogênea das diferentes frações granulométricas será utilizada por ser uma proporção que

apresenta um bom rendimento em escala industrial. A maior proporção da subfração nucleante e a menor da subfração intermediária, influenciam nos resultados dos testes realizados.

A distribuição granulométrica das diferentes subfrações é a mesma para todos os níveis de queima: assim, poderá ser conhecido o comportamento de cada subfração dos diferentes minérios. Esse estudo poderá auxiliar, no futuro, a escolha dos tipos de minério e em qual subfração determinado tipo de minério irá compor a mistura, visando a obter um sinter com maior rendimento no processo.

VIII.1 – Composição da Mistura

A composição mineralógica de cada nível de queima é feita com os minerais de ferro presentes nos diferentes tipos de minérios de ferro utilizados em cada mistura. Os diferentes níveis de queima apresentam uma distribuição mineralógica diferenciada, associada à distribuição dos diferentes minerais de cada tipo de minério. As distribuições mineralógicas apresentadas nos gráficos das FIGURAS 70 e 71 são apenas dos minerais encontrados sem os poros existentes.

A FIGURA 70 mostra as distribuições mineralógicas das subfrações nucleantes dos diferentes tipos de minérios, mantendo-se a distribuição das subfrações aderentes (minério blendado) constantes. Na FIGURA 71, tem-se a relação inversa, ou seja, as distribuições mineralógicas das subfrações aderentes dos diferentes tipos de minérios com as subfrações nucleantes (minério blendado) constantes.

Nas FIGURAS 70 e 71, têm-se uma ilustração qualitativa e quantitativa dos minerais de ferro presentes dentro de cada mistura. Não estão

representados os minerais contidos nos fundentes, adições e sinter de retorno, pois estes foram mantidos constantes para todos os níveis de queima.

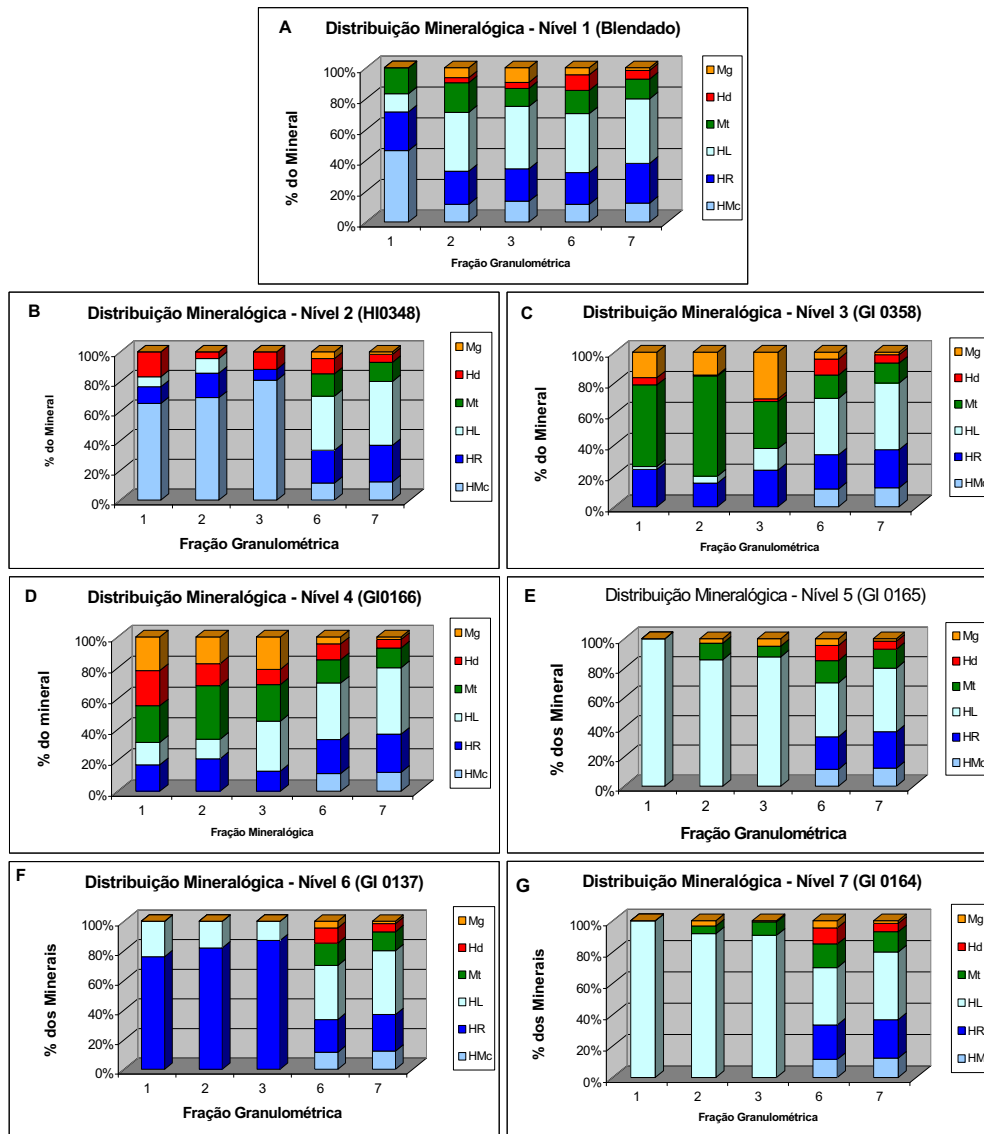


FIGURA 70 – Distribuição mineralógica dos diferentes níveis de queima das subfrações nucleantes, as subfrações granulométricas 6 e 7 são compostas da distribuição mineralógica do minério blendado. As subfrações intermediárias são compostas do sinter industrial da Usiminas.

A distribuição mineralógica apresentada na FIGURA 71 dos diferentes níveis de queima das subfrações nucleantes encontra-se descrita abaixo. A hematita é o mineral predominante em todos os minerais, no entanto a sua forma de ocorrência é diferenciada, ou seja, esse mineral pode ocorrer como Mt, Hr, HI e

Hm. A Mg (magnetita) é encontrada em quantidades expressivas nos minérios Blendado, GI 0358 e GI 0166; em menor quantidade (em algumas partículas primárias), nos minérios GI 0164 e GI 0165. O Mh (mineral hidratado) ocorre em maior proporção nos minérios GI 0166 e HI 0348; em menor quantidade, nos minérios GI 0358 e Blendado; nos demais minérios, sua presença é incipiente.

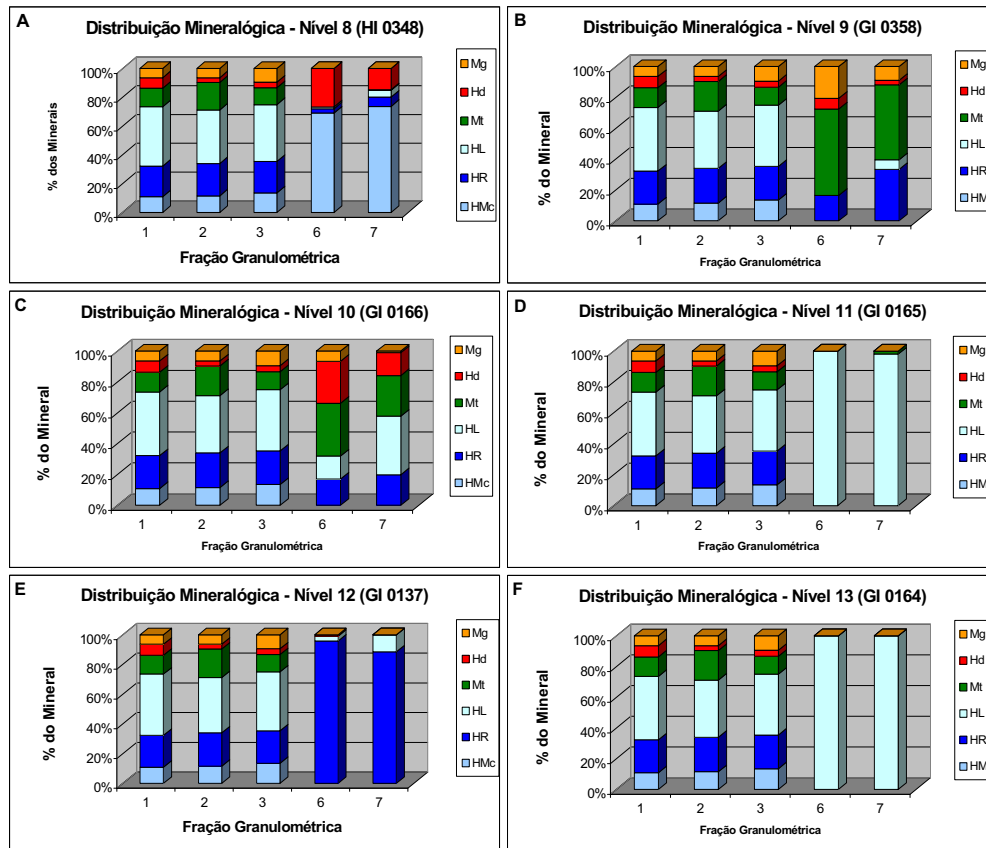


FIGURA 71 – Distribuição mineralógica dos diferentes níveis de queima das subfrações aderentes, as subfrações granulométricas 1, 2 e 3 são compostas da distribuição mineralógica do minério blendado. As subfrações intermediárias são compostas do sinter industrial da Usiminas.

As subfrações aderentes dos minérios apresentam uma distribuição mineralógica com menor variação (FIGURA 71). Nessa figura, ocorre o predomínio da hematita nas suas diferentes formas de ocorrência. No minério HI 0348, há o predomínio da Hm com Hr e Hl subordinadas. Nos minérios GI 0348 e GI 0166, há maior quantidade de Mt, com Hr e lamelar subordinada. Nos minérios GI 0137 e GI 0165, ocorre o predomínio da Hr com Hl subordinada. E, no minério GI 0164, é encontrado apenas Hl com rara presença de Hr subordinada.

Os minerais Mg e Mh, nos resultados experimentais, são os que apresentam maiores diferenciações conhecidas; enquanto que os diferentes graus de cristalinidades da hematita não indicam grande interferência nesses resultados, conforme também poderá ser visto no próximo capítulo.

A Mg é encontrada nos minérios GI 0358 e GI 0166; neste último com menor quantidade, sua participação é ainda menor na sua subfração aderente (FIGURA 71).

O Mh é bastante representativo nos minérios HI 0348 e GI 0166, sendo de menor expressão no minério GI 0358, conforme pode ser visto na FIGURA 71.

VIII.2 – Microaglomeração

O processo de microaglomeração é a etapa mais importante antes do processo de sinterização propriamente dito, visto que maior grau de nucleação associado ao grau de resistência de uma micropelota “crua” (sem queima), torna o leito de sinterização mais permeável, aumentando assim a eficiência do processo (ABOUZEID & SEDDIK, 1981; ARAÚJO FILHO, 1986; HINKLEY et al., 1994).

A obtenção de micropelotas bem nucleadas e resistentes está associada ao grau de umidade adequada, cuja capilaridade da água na superfície das partículas primárias associada à rotação do misturador, permite maior capacidade de nucleação das micropelotas (LITSTER & WATERS, 1990; ARAÚJO FILHO, 1986; HINKLEY et al., 1994; VENKATARAMANA et al., 1999).

O grau de umidade ótima é obtido através de testes de misturamento e queima das micropelotas, geradas com diferentes graus de umidade. Aquela umidade que obtiver maior grau de nucleação e micropelotas mais resistentes será a umidade adotada para a realização das queimas normais (ABOUZEID; HINKLEY et al., 1994; VENKATARAMANA et al., 1999).

O grau de umidade ótima foi determinado em 6% para todos os minérios, exceto para o minério GI 0166, cuja umidade foi de 7% (TABELA 49 ver tabela resumo). Esse maior grau de umidade ótima para o minério GI 0166 deve-se às características intrínsecas desse minério, tais como: mineralogia e porosidade; cuja água adicionada pode ser adsorvida pelas partículas primárias (ABOUZEID & SEDDIK, 1981).

O grau de microaglomeração será apresentado por tamanho de micropelotas, em gráficos onde são mostrados os diferentes tipos de *sinter feed* com a distribuição das partículas primárias presentes em cada tamanho de micropelotas.

Os dados para a confecção dos gráficos 72 a 89, foram gerados através da amostragem de micropelotas “cruas”. Essas micropelotas amostradas passaram por processo de peneiramento e separação granulométrica (separadas por faixa granulométrica). Após esse processo de separação, as micropelotas de cada faixa granulométrica foram quebradas e peneiradas novamente, obtendo-se assim, a distribuição das partículas primárias para cada faixa granulométrica.

O minério blendado (em vermelho) será utilizado como referência, para efeito de comparação; visto que todas as misturas do presente estudo são experimentais e nenhuma apresenta comportamento previamente conhecido.

As diferentes subfrações estudadas de cada tipo de minério apresentam comportamentos diferenciados na geração dessas micropelotas, conforme pode ser observado nos gráficos 72 a 89. Essa diferenciação está associada ao tipo de partícula primária gerada por cada subfração dos minérios estudados, permitindo maior ou menor aderência das micropelotas geradas por cada subfração granulométrica.

VIII.2.1 – MICROPELOTAS 4,76 mm

As micropelotas de 4,76 mm das subfrações nucleantes, intermediárias e aderentes têm a distribuição das partículas individuais diferenciadas para cada tipo de *sinter feed*, (FIGURAS 72; 73; 74). Essas micropelotas são aquelas retidas na malha de 4,76 mm.

As micropelotas deste tamanho apresentam partículas primárias menores ou iguais a 4,76 mm, que ficaram retidas nas peneiras especificadas pelas malhas de 4,76 mm, 2,83 mm, 1,00 mm, 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm.

As partículas primárias de 4,76 mm presentes nessas micropelotas indicam que participaram como nucleantes das partículas mais finas; no entanto, pequena parte dessas partículas pode ter permanecido como partículas isoladas.

As partículas primárias de 2,83 mm participam de forma significativa nessas micropelotas, provavelmente na forma de partículas nucleantes, em menor proporção como partículas aderentes da partícula primária de 4,76 mm.

A participação da subfração intermediária nessas micropelotas é muito pequena, i.e., a participação das partículas de 1,00 mm é praticamente nula e as de 0,50 mm é insignificante. No entanto, em alguns minérios há maior contribuição dessas partículas primárias.

As partículas aderentes mostram uma contribuição significativa na formação dessas micropelotas, com menor participação da partícula primária de 0,25 mm que a de <0,25mm.

As micropelotas de 4,76 mm dos minérios estudados apresentam dois tipos de gráficos. No primeiro, há diferença significativa na quantidade de partículas 4,76 mm e 2,83 mm e menor quantidade de partículas primárias intermediárias e aderentes. No segundo, essa diferença é menor e tem maior participação de partículas intermediárias e aderentes (FIGURA 72). O primeiro tipo é representado pelos minérios blendado, HI 0348, GI 0358 e GI 0166, o segundo, pelos minérios GI 0137, GI 0165 e GI 0164.

O minério blendado possui menor quantidade de partículas primárias de 4,76 mm em relação aos demais minérios desta subfração.

O minério HI 0348 é levemente diferente em relação aos demais minérios do primeiro tipo. Esse minério tem maior quantidade de partículas primárias de 4,76 mm e menor de 2,83 mm nessas micropelotas. Isso sugere que houve maior participação das partículas individuais de 4,76 mm na geração dessas micropelotas; pode ser indício de que as mesmas não tiveram bom desempenho como nucleantes. As partículas primárias intermediárias e aderentes dessa mistura apresentam padrão semelhante ao do minério blendado.

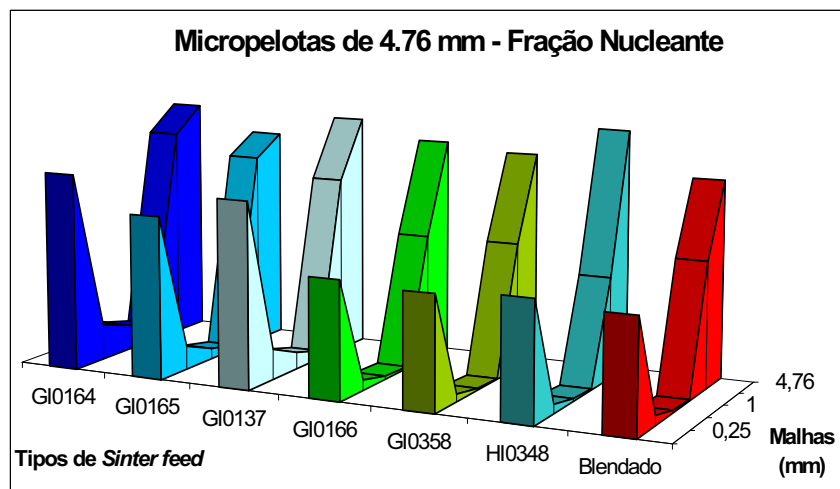


FIGURA 72 – Gráfico das micropelotas de 4,76 mm das subfrações nucleantes dos tipos de minérios estudados com a distribuição das partículas individuais presentes.

Os minérios GI 0358 e GI 0166 contém quantidade pouco maior das partículas primárias de 4,76 mm em relação ao minério blendado. Apesar disso, comportam-se de forma semelhante, tanto com relação às partículas primárias nucleantes quanto às partículas intermediárias e aderentes.

Os minérios representantes do segundo tipo possuem maiores quantidades de partículas primárias mais finas, participando na formação dessas micropelotas de 4,76 mm. Através disso, pode-se dizer que há uma distribuição mais homogênea das partículas primárias dessas misturas na geração dessa micropelota mais grossa.

Os gráficos de distribuição das partículas primárias da subfração intermediária, mostram padrões bastante semelhantes entre si, com pequena variação em relação à quantidade de partículas primárias (FIGURA 73). Apesar disso, podem ser separados dois tipos de comportamento, conforme a descrição a seguir.

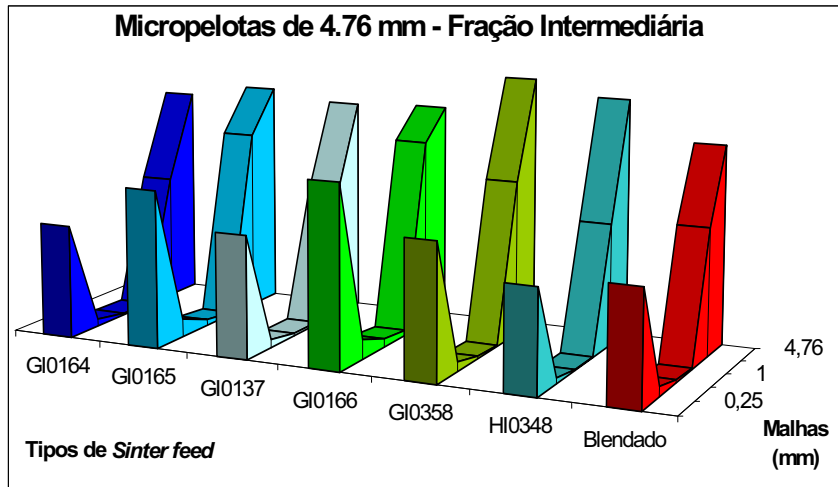


FIGURA 73 – Gráfico das micropelotas de 4,76 mm das subfrações intermediárias dos tipos de minérios estudados com a distribuição das partículas individuais presentes.

Os minérios HI 0348, GI 0358, GI 0137 e GI 0164 são similares ao minério blendado. No entanto, possuem maior quantidade de partículas primárias de 4,76 mm, indicando maior participação dessas partículas na geração das micropelotas de 4,76 mm.

Os minérios GI 0166 e GI 0165 representam padrão de gráfico diferenciado, com quantidades maiores de partículas primárias de 2,83 mm que os demais minérios. Esses minérios mostram maior eficiência na nucleação das partículas primárias das subfrações intermediárias, bem como das subfrações aderentes. O minério GI 0166 foi o que mais aderiu às partículas primárias < 0,25 mm.

As micropelotas de 4,76 mm das subfrações aderentes dos diferentes tipos de *sinter feed* formam dois tipos de padrões, conforme pode ser observado na FIGURA 74.

O primeiro tipo é representado pelos seguintes minérios: blendado, HI 0348, GI 0358, GI 0165 e GI 0164. O minério GI 0137 forma um tipo intermediário; o minério GI 0166 forma o segundo tipo, com padrão completamente diferente dos demais minérios.

Nos minérios do primeiro tipo, as partículas primárias de 4,76, 2,83 e <0,25 mm participam em maior proporção; com pequena quantidade de partículas 0,25 mm e 0,5 mm e uma quantidade ínfima de partículas de 1,00 mm na formação dessas micropelotas. O minério HI 0348 é formado com maior quantidade e o minério blendado, a menor quantidade de partículas primárias de 4,76 mm.

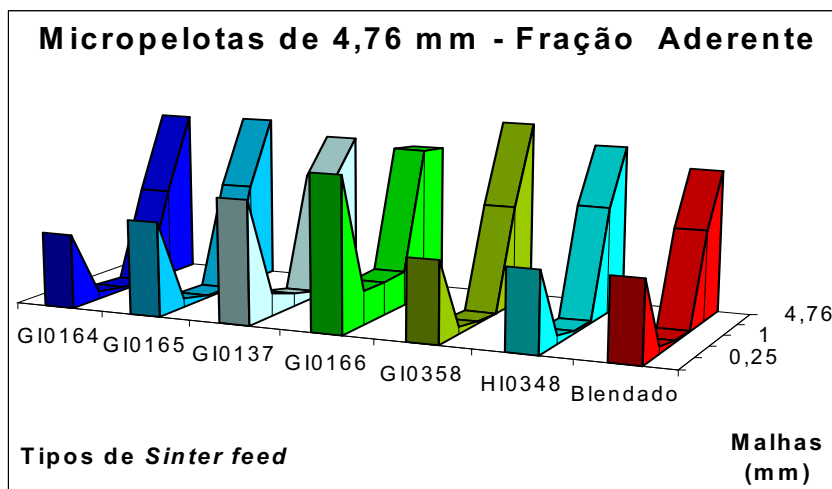


FIGURA 74 – Gráfico das micropelotas de 4,76 mm das subfrações aderentes dos tipos de minérios estudados com a distribuição das partículas individuais presentes.

No segundo tipo, as micropelotas foram geradas com maior contribuição das partículas primárias de 2,83 mm que de 4,76 mm. Outra diferença, é na grande quantidade de partículas primárias intermediárias e aderentes, participantes nas micropelotas e geradas pela subfração 2,83 mm.

O minério GI 0137 apresenta um padrão intermediário com maior contribuição das partículas primárias de 2,83 mm que o do primeiro tipo e menor que o segundo e também maior quantidade de partículas primárias intermediárias e aderentes que os minérios do primeiro tipo.

VIII.2.2 – MICROPELOTAS DE 2,83 mm

As micropelotas de 2,83 mm das subfrações nucleantes, intermediárias e aderentes apresentam a distribuição das partículas individuais diferenciadas para cada tipo de *sinter feed*, retidas nas peneiras especificadas pelas malhas de 2,83 mm, 1,00 mm, 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm (FIGURAS 75; 76; 77).

Na FIGURA 75, tem-se a distribuição das partículas primárias dos diferentes tipos de minérios na subfração nucleante estudada, com dois padrões. O primeiro acompanha o minério blendado, composto pelos minérios HI 0348, GI 0358 e GI 0166 com menor contribuição das partículas primárias de 1,00 mm; o segundo, com maior contribuição das mesmas, é composto pelos minérios GI 0137, GI 0165 e GI 0164.

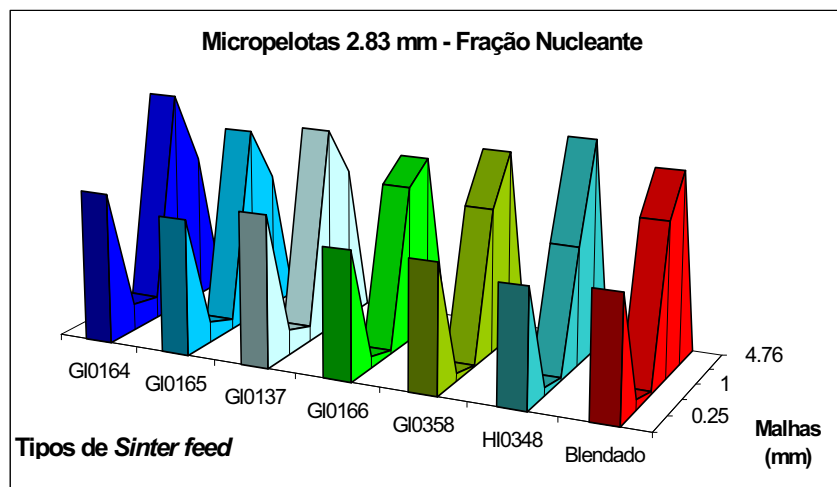


FIGURA 75 – Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 2,83 mm dos diferentes tipos de Sinter feed na subfração nucleante.

O primeiro grupo mostra maior proporção de partículas 2,83 que a de 1,00 mm. Neste grupo, o minério com a menor quantidade de partículas primárias de 1,00 mm é o HI 0348 e o com a maior quantidade é o minério GI 0166. A contribuição das partículas primárias das subfrações intermediárias (0,50 mm) e aderentes (0,25 mm e <0,25 mm) desse grupo apresenta-se bem menor que no segundo grupo.

O segundo grupo apresenta maior participação das partículas primárias de 1,00 mm que de 2,83 mm e maior contribuição das partículas primárias de 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm. Nos minérios desse tipo, há maior participação das partículas primárias mais finas nas gerações dessas micropelotas, indicando maior eficiência de microaglomeração.

As micropelotas de 2,83 mm geradas pela subfração intermediária apresentam três tipos de comportamento (FIGURA 76). O primeiro tipo é representado pelo minério blendado, HI 0348 e GI 0137; o segundo tipo, pelos minérios GI 0358 e GI 0164; o terceiro, pelos minérios GI 0166 e GI 0165.

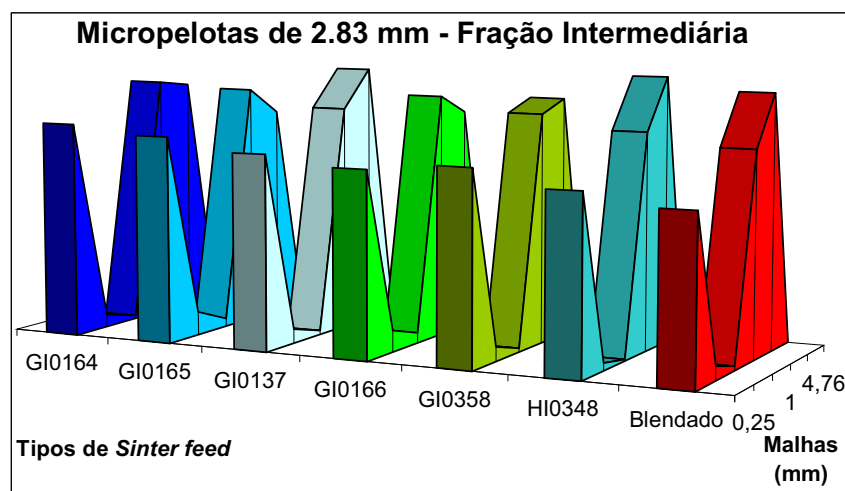


FIGURA 76 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 2,83 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração intermediária.

O primeiro grupo caracteriza-se pela maior quantidade de partículas primárias de 2,83 mm em relação às de 1,00 mm, bem como pela menor contribuição das partículas de 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm. O minério HI 0348 é o de menor quantidade de partículas primárias da subfração aderente.

O segundo grupo apresenta quantidades muito próximas de partículas primárias de 2,83 mm e 1,00 mm. No minério GI 0164, há maior quantidade de partículas primárias de 1,00 mm em relação à de 2,83 mm e no minério GI 0358 a relação é inversa. O primeiro minério é o que possui maior participação das das partículas primárias < 0,25 mm nessas micropelotas.

No terceiro grupo, há maior contribuição das partículas primárias de 1,00 mm que as partículas de 2,83 mm. Os minérios GI 0165 e GI 0166 apresentam maior contribuição das partículas primárias de 0,50 mm e 0,25 mm.

As micropelotas de 2,83 mm, geradas pelas subfrações aderentes dos diferentes tipos de minérios, mostram três tipos comportamento (FIGURA 77).

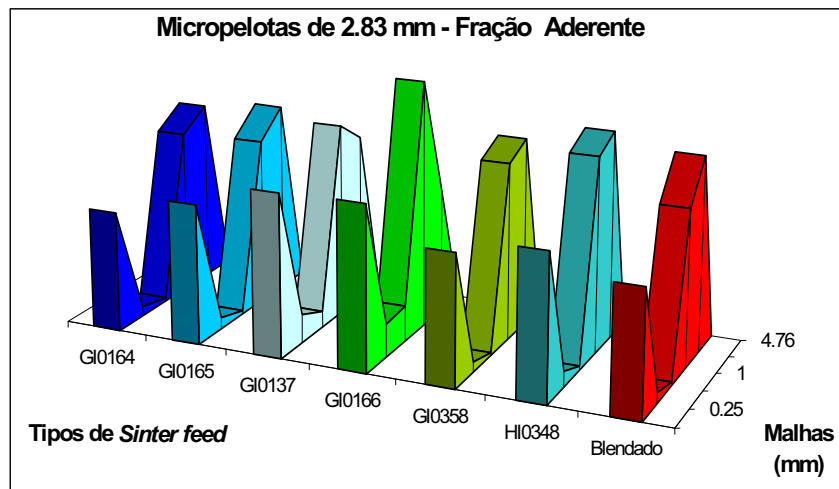


FIGURA 77 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 2,83 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração aderente.

O primeiro tipo é representado pelos minérios blendado, HI 0348, GI 0358, GI 0165 e GI 0164, cujas micropelotas foram nucleadas com contribuição significativa das partículas primárias de 1,00 mm, 0,25 mm (em menor escala), bastante partículas de < 0,25 mm e muito poucas de 0,50 mm. Os minérios HI 0348 e GI 0358 apresentam quantidades de partículas primárias de 2,83 mm e 1,00 mm muito próximas, sendo que no primeiro há maior participação das partículas primárias de < 0,25 mm. O minério blendado é o que apresenta a menor quantidade de partículas de 2,83 mm participantes dessas micropelotas.

O segundo tipo de gráfico é representado pelo minério GI 0166, que tem pequena contribuição de partículas de 2,83 mm e grande quantidade de partículas de 1,00 mm; é também o minério com maior quantidade de finos aderidos e partículas primárias de 0,50 mm.

O terceiro tipo é representado pelo minério GI 0137 com quantidade de partículas primárias de 1,00 mm maior que as de 2,83 mm. Este tipo apresenta comportamento intermediário entre os minérios do primeiro e segundo tipo.

VIII.2.3. – MICROPELOTAS DE 1,00 mm

As micropelotas de 1,00 mm são formadas por partículas individuais de 1,00 mm, 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm (FIGURAS 78; 79; 80)

As micropelotas retidas por esta malha não apresentam mais a subfração nucleante. No entanto, é observado que essas partículas primárias intermediárias e aderentes também formam micropelotas, visto que nessas micropelotas são encontradas partículas primárias mais finas. Provavelmente, essas partículas participaram como nucleantes, agregando material na sua superfície, tornando-se maior que seu tamanho original e/ou como aderentes, ficando aderidas na superfícies das partículas primárias de 1,00 mm.

Na FIGURA 78, tem-se as micropelotas presentes na malha de 1,00 mm das subfrações nucleantes estudadas. Os gráficos dos diferentes tipos de minério mostram comportamento bastante semelhante.

Os gráficos indicam diferenças com relação à quantidade de partículas primárias de 1,00 mm. Os minérios blendado HI 0348, GI 0358 e GI 0166 apresentam maiores quantidades dessas partículas. Enquanto que os minérios GI 0137, GI 0165 e GI 0164 mostram quantidades menores dessas partículas. Os primeiros minérios citados têm maiores quantidades de partículas primárias <0,25

mm participando dessas micropelotas que os do segundo grupo. Em relação às partículas de 0,25 mm a situação é inversa.

Na FIGURA 79, tem-se a distribuição das partículas primárias retidas nas peneiras das micropelotas de 1,00 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* nas suas subfrações intermediárias.

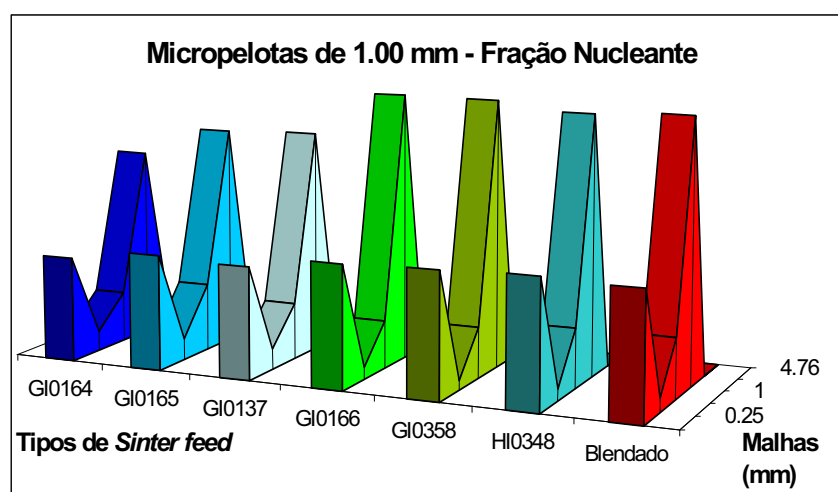


FIGURA 78 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 1,00 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração nucleante.

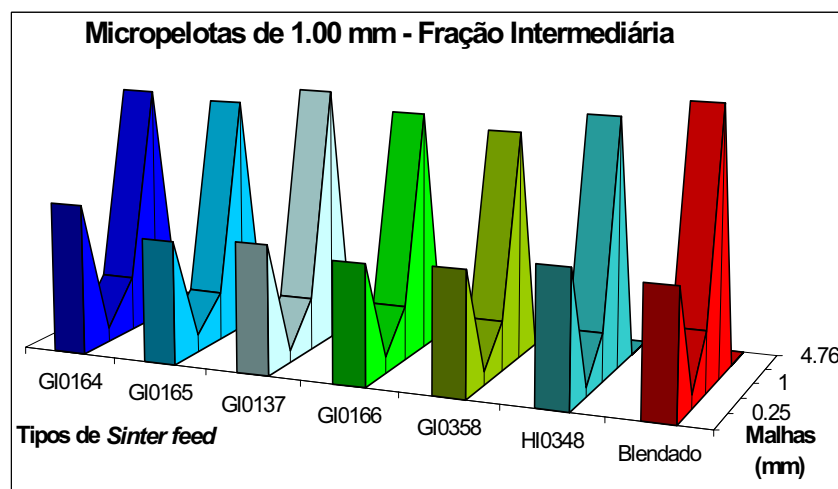


FIGURA 79 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 1,00 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração intermediária.

Nota-se que os minérios mostram padrões semelhantes, variando apenas na quantidade de partículas primárias de 1,00 mm e <0,25 mm.

As partículas da subfração intermediária apresentam variações perceptíveis apenas nas partículas de 1,00 mm, enquanto nas partículas de 0,50 mm têm praticamente a mesma quantidade. O minério blendado é o que apresenta a maior quantidade de partículas primárias de 1,00 mm, sendo o minério GI 0358 com a menor quantidade.

O minério com maior quantidade de partículas primárias de <0,25 mm é o GI 0164, com o menor é o minério GI 0166. Em relação às partículas primárias de 0,25 mm, o minério GI 0165 tem maior quantidade e o minério HI 0348 a menor.

Na FIGURA 80, tem-se a distribuição das diferentes partículas primárias encontradas nas micropelotas de 1,00 mm da subfração aderente dos diferentes tipos de *sinter feed* estudados.

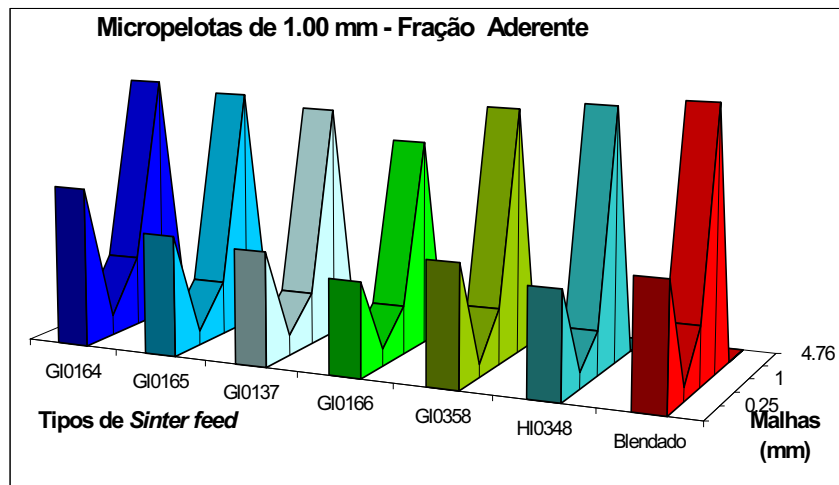


FIGURA 80 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 1,00 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração aderente.

O gráfico acima mostra que o minério de menor quantidade de partículas individuais de 1,00 mm é o GI 0166, seguido do minério GI 0137. Os demais minérios apresentam quantidades relativamente grandes de partículas primárias de 1,00 mm, sendo o minério blendado com a maior quantidade, seguido do minério GI 0164. As partículas primárias de 0,50 mm e < 0,25 mm acompanham

o comportamento das partículas primárias de 1,00 mm. No entanto, as partículas primárias de 0,25 mm encontram-se em maior quantidade no minério GI 0137, seguido do minério GI 0164. Os demais minérios apresentam situações intermediárias.

Os minérios com maiores quantidades de partículas primárias de 1,00 mm são os que têm maior quantidade de partículas <0,25 mm aderidas e a relação inversa, também ocorre, como no caso do minério GI 0166 que tem menor quantidade de partículas de 1,00 mm e de <0,25 mm. Isso deve ter ocorrido, devido à relação de equilíbrio entre as partículas nucleantes e aderentes dessas partículas primárias.

VIII.2.4 – MICROPELOTAS DE 0,50 mm

As micropelotas geradas desse tamanho apresentam partículas primárias retidas nas peneiras de 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm (FIGURAS 81, 82; 83).

A presença dessas micropelotas no processo de microaglomeração indica que essas partículas mais finas também podem ter atuado como partículas nucleadoras.

A distribuição das micropelotas de 0,50 mm apresentada pelas subfrações nucleantes nos diferentes tipos de *sinter feed* estudados, encontra-se disposta na FIGURA 81.

Na FIGURA 81, observa-se que os minérios com maior quantidade de partículas primárias de 0,50 mm são o GI 0166 e o minério GI 0358; enquanto que os minérios com as menores quantidades são GI 0164 e GI 0137.

Com relação às partículas primárias aderentes de 0,25 mm e <0,25 mm, presentes nessas micropelotas, os minérios GI 0164 e o HI 0348 são os que apresentam a menor e a maior quantidade dessas partículas, respectivamente.

Observe-se que no minério GI 0166 é encontrada maior quantidade da partícula 0,25 mm que de <0,25 mm; os outros minérios apresentam a relação inversa, sendo bastante visíveis nos minérios HI 0348, GI 0166 e GI 0164.

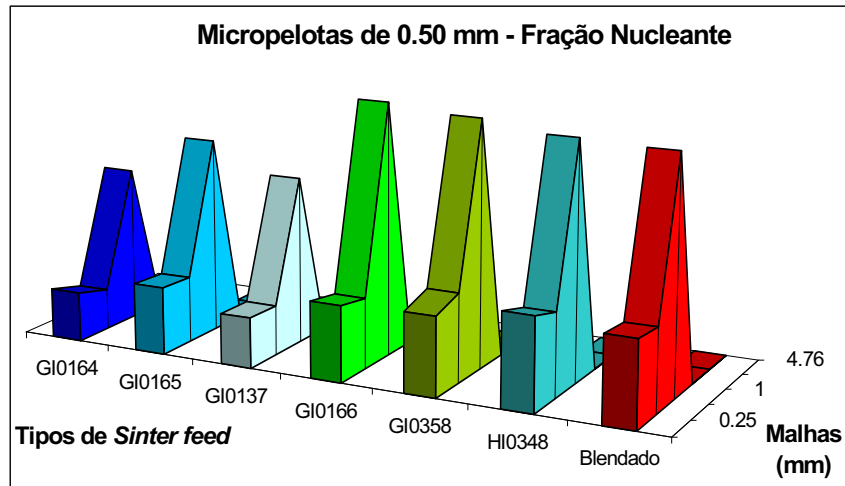


FIGURA 81 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0,50 mm dos diferentes tipos de sinter feed da subfração nucleante.

Assim pode-se concluir que os minérios que apresentam melhor grau de microaglomeração desse tamanho foram os que apresentam menor quantidade de partículas primárias de 0,50 mm: GI 0137, GI 0165 e GI 0164. Os outros minérios apresentam grande quantidade de partículas primárias livres de 0,50 mm, indicando que essas partículas não foram utilizadas para compor as micropelotas maiores.

As micropelotas de 0,50 mm das subfrações intermediárias dos minérios estudados encontram-se representadas na FIGURA 82.

Os minérios que apresentam as maiores quantidades de partículas primárias de 0,50 mm são HI 0348 e GI 0137, as de menores quantidades são GI 0166 e GI 0164. Os demais apresentam quantidades intermediárias a esses minérios.

As partículas primárias aderentes apresentam sua menor e maior quantidade nos minérios GI 0166 e GI 0164, respectivamente. Dentre esses, os minérios GI 0166, GI 0164 e o blendado apresentam maior quantidade de partículas primárias de 0,25 mm em relação às partículas de <0,25 mm; os demais apresentam situação inversa, sendo a diferença maior no minério HI 0348.

As micropelotas de 0,50 mm da subfração aderente dos minérios estudados apresentam a distribuição das partículas individuais de acordo com a FIGURA 83.

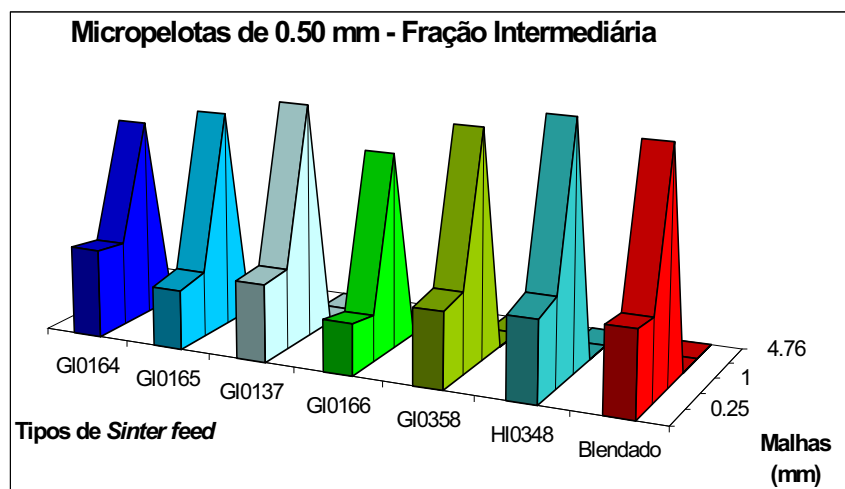


FIGURA 82 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0,50 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração intermediária.

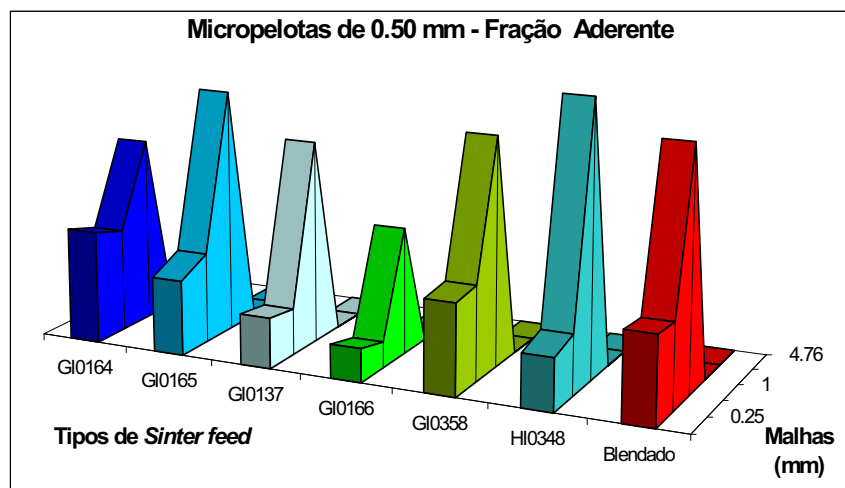


FIGURA 83 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0,50 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração aderente.

O minério HI 0348 é o que apresenta a maior quantidade de partículas primárias de 0,50 mm e uma quantidade relativamente pequena de partículas primárias aderentes, indicando a menor eficiência de nucleação das partículas primárias de 0,50 mm.

O minério que apresenta a maior geração de micropelotas de 0,50 mm é o GI 0164, pois possui uma quantidade intermediária de partículas primárias de 0,50 mm e a maior quantidade de partículas primárias de 0,25 mm e <0,25 mm. O que mostra um melhor aproveitamento das partículas mais finas.

Os minérios que apresentam menores quantidades de partículas primárias de 0,25 mm e <0,25 mm indicam que tiveram um menor aproveitamento das mesmas, ou seja, essas partículas não se nuclearam, apenas aderiram às superfícies das partículas de 0,50 mm. Por outro lado, os minérios com maiores quantidades dessas mesmas partículas indicam que as mesmas apresentam comportamento de nucleação melhor.

VIII.2.5 – MICROPELOTAS 0,25 mm

As micropelotas geradas de 0,25 mm representam pequena quantidade em relação às micropelotas mais grossas. No entanto, nessa subfração foram geradas pequenas micropelotas, como pode ser visto pela presença de partículas primárias mais finas <0,25 mm.

Os minérios com maiores quantidades de partículas primárias < 0,25 mm são os que mais participam da nucleação das micropelotas de tamanho 0,25 mm. Isso indica que, na geração dessas micropelotas, houve participação das partículas primárias mais finas, que podem ter participado como aderentes e/ou nucleantes, ou seja, contribuíram para o crescimento do tamanho das partículas primárias dos diferentes tipos de minérios.

As subfrações dos diferentes tipos de *sinter feed* que apresentam grandes quantidades de partículas primárias de 0,25 mm indicam que essas partículas não tiveram grande participação na geração das micropelotas maiores, pois foram menos eficientes como partículas aderentes.

A distribuição das partículas primárias das micropelotas de 0,25 mm, geradas pela mistura de minérios das subfrações nucleantes estudadas, está na FIGURA 84.

Os minérios que apresentam menor quantidade de partículas primárias < 0,25 mm são os que tiveram melhor eficiência em aglomerar as partículas mais finas na geração das micropelotas mais grossas, ou essas partículas não permitiram uma boa aderência na geração dessas micropelotas, tais como os minérios GI 0137, GI 0165 e GI 0164.

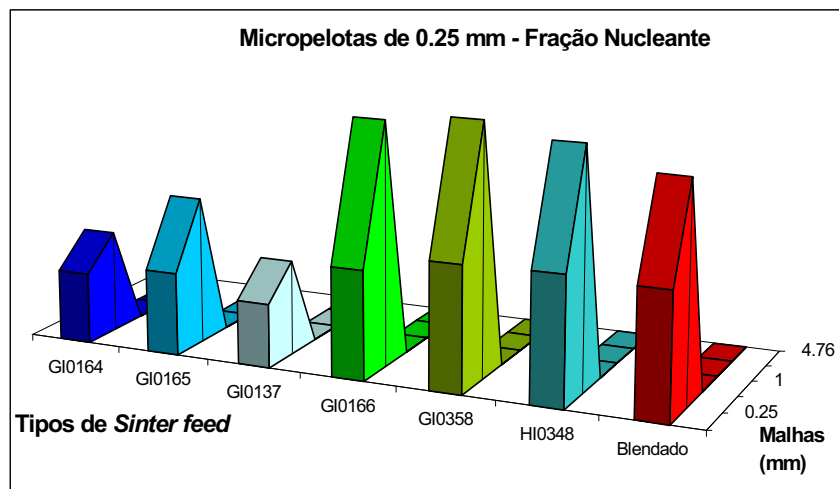


FIGURA 84 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0,25 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração nucleante.

Os minérios que apresentam maior quantidade de partículas primárias de 0,25 mm são os minérios GI 0358, GI 0166, HI 0348 e blendado, em ordem decrescente de quantidade.

Apesar disso, observa-se que os minérios com maior quantidade de partículas de 0,25 mm apresentam também maior quantidade de finos <0,25 mm. Isto indica que de alguma forma essas partículas mais finas ficaram aderidas umas

nas outras, formando pequenas micropelotas ou recobriram as partículas primárias de 0,25 mm.

A distribuição das micropelotas de 0,25 mm, geradas pela mistura de minérios das subfrações intermediárias estudadas, está apresentada na FIGURA 85.

O minério que apresenta a maior quantidade de partículas primárias de 0,25 mm é o HI 0348; enquanto o minério GI 0166, a menor quantidade dessa partícula. Com relação às partículas de <0,25 mm, os minérios HI 0348 e GI 0166 são os que apresentam maior e menor quantidade dessas partículas, respectivamente.

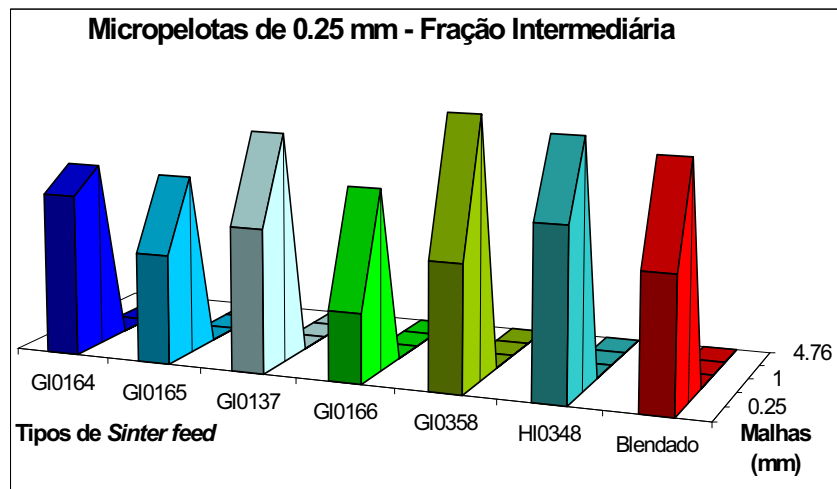


FIGURA 85- Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0,25 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração intermediária.

A maior diferença entre essas duas partículas é dada pelo minério GI 0358, a menor é dada pelo minério GI 0164. A diferença maior indica que as partículas mais finas não foram eficientes em aderir na superfície das micropelotas mais grossas e nem permitiram que aderissem sobre a sua superfície. E a menor diferença indica que essas partículas mais finas participaram de forma mais intensa na geração de pequenas micropelotas.

A distribuição das micropelotas de 0,25 mm, geradas pela mistura de minérios das subfrações aderentes estudadas, está representada na FIGURA 86.

O minério blendado é o que apresenta a maior quantidade de partículas primárias de 0,25 mm; a menor quantidade é dada pelo minério GI 0166. Com relação às partículas <0,25 mm, o minério GI 0165 é o que tem a maior quantidade e o minério GI 0166 a menor.

Na FIGURA 86, observa-se que o minério que mais teve essas partículas primárias consumidas foi o minério GI 0166, já o minério blendado caracteriza-se por ter comportamento inverso. Essa menor quantidade dessas partículas no minério GI 0166 deve-se ao seu maior consumo na geração das micropelotas maiores.

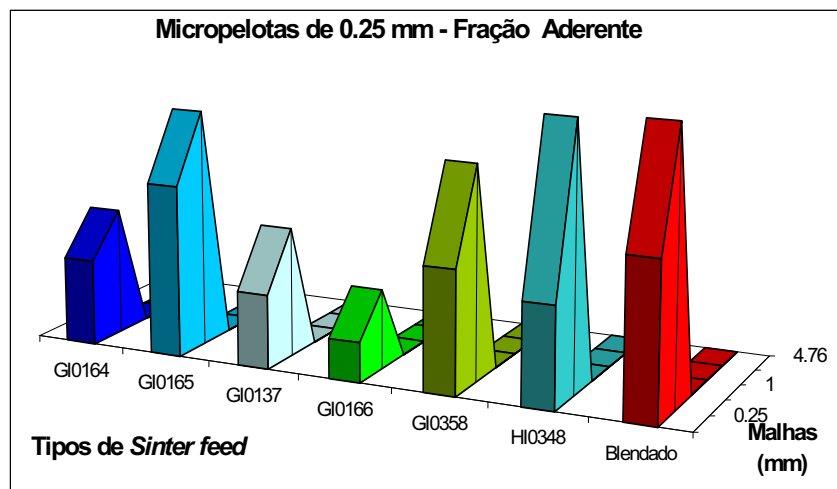


FIGURA 86 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de 0,25 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração aderente.

Os minérios com maiores quantidades de partículas primárias de 0,25 mm mostram que estas não foram consumidas na geração das micropelotas maiores. E a maior quantidade de partículas primárias de < 0,25 mm sugere que estas participaram no crescimento das micropelotas desse tamanho, tanto como aderente quanto como nucleantes. Destes, o minério GI 0165 apresentou um bom consumo das partículas primárias < 0,25 mm.

VIII.2.6 – PARTÍCULAS PRIMÁRIAS <0,25 mm

Aqui tem-se as partículas primárias que não foram aglomeradas, observando-se o grau de eficiência de aglomeração de cada tipo de *sinter feed* nas suas subfrações. Os minérios que apresentam maiores quantidades de partículas primárias, portanto, são os que menos aglomeraram essas partículas nucleantes. Os que têm menores quantidades são os que mais aglomeraram.

Esse melhor ou pior comportamento desses minérios está associado ao consumo das partículas finas. No entanto, nesse processo de microaglomeração deve ser observado ainda o tamanho de crescimento médio das micropelotas; além de outros fatores que influenciam no rendimento do processo de sinterização e qualidade do produto *sinter* gerado.

Na FIGURA 87, pode ser observado que as subfrações nucleantes dos diferentes minérios estudados apresentam dois grupos com proporções das partículas primárias < 0,25 mm bem distintas.

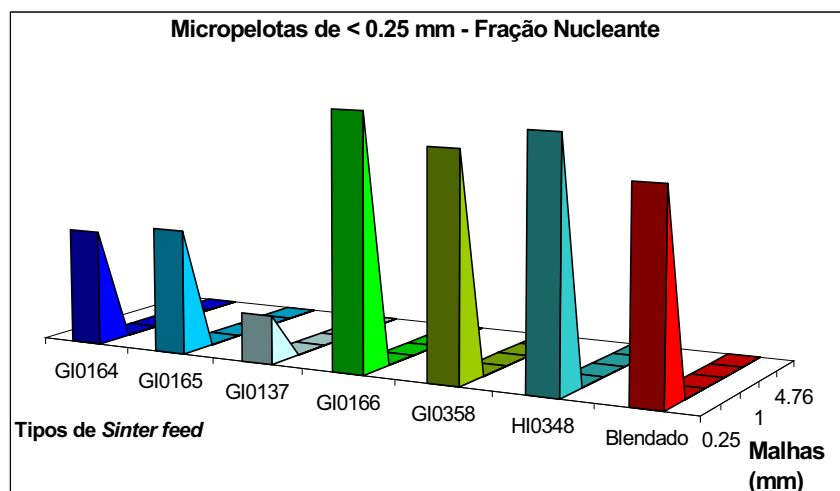


FIGURA 87 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de <0,25 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração nucleante.

Nessa subfração, o minério GI 0137 teve melhor desempenho no processo de microaglomeração, visto que este minério tem a menor quantidade de

partículas primárias de <0,25 mm. Tal fato sugere que as mesmas foram consumidas na geração das micropelotas mais grosseiras. Os minérios GI 0166 e o HI 0348 são os que têm maiores quantidades dessas partículas, indicando serem minérios menos eficientes nesse processo de microaglomeração.

Nessa subfração, é possível observar que os minérios hematíticos são mais eficientes na aglomeração dessas partículas mais finas, enquanto que os minérios com algum grau de hidratação são menos eficientes. Isso pode indicar que, nos minérios hematíticos, essas partículas primárias aderem melhor nas superfícies das partículas primárias nucleantes.

As partículas primárias de <0,25 mm dessa subfração dos diferentes tipos de *sinter feed* mostram que os minérios hematíticos apresentam menores quantidades dessas partículas, os minérios hidratados maiores quantidades (FIGURA 88).

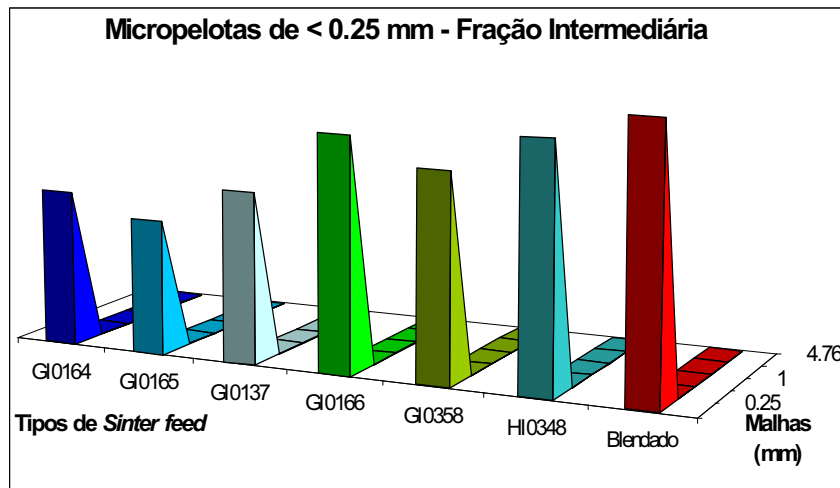


FIGURA 88 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de <0,25 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração intermediária.

O minério com maior quantidade dessas partículas primárias é o blendado; com a menor, é o minério GI 0165. Isso indica que o minério blendado foi menos eficiente na aglomeração dessas partículas primárias, o minério GI 0165 como o mais eficiente.

A diferença na quantidade das partículas primárias < 0,25 mm entre esses dois grupos não é tão marcante quanto a apresentada pela subfração

nucleante. Essa menor diferença deve-se, provavelmente, à menor participação da subfração intermediária na mistura a ser sinterizada.

As partículas primárias de <0,25 mm desta subfração apresentam uma variação significativa entre os minérios (FIGURA 89). No entanto, não é possível fazer uma diferenciação por tipos, como nas misturas das subfrações nucleante e intermediária.

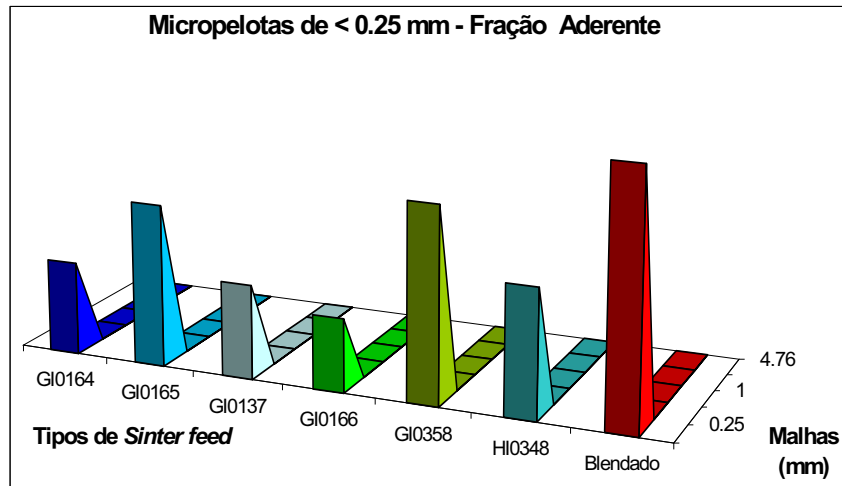


FIGURA 89 - Gráfico da distribuição das partículas primárias nas micropelotas de <0,25 mm dos diferentes tipos de *sinter feed* na subfração aderente.

Isso deve-se ao fato dessas partículas primárias < 0,25 mm serem representantes dos diferentes tipos de minérios estudados, cujos comportamentos refletem as suas características individuais. Os gráficos apresentados mostram que essas partículas podem ser partículas boas ou más aderentes.

Nessa subfração, o minério blendado é o que apresenta maior quantidade, ou seja, foi o menos eficiente no processo de microaglomeração; o minério GI 0166 foi o mais eficiente. A diferença nas quantidades dessas partículas primárias entre esses dois minérios é muito grande. Os demais minérios apresentam quantidades intermediárias entre esses dois extremos.

VIII.3 – Distribuição das Partículas Primárias nas Subfração granulométricas de Micropelotas

Os gráficos de distribuição granulométricas das partículas individuais e micropelotas, apresentados abaixo, indicam o grau de crescimento das partículas primárias, dado pela proporção das micropelotas encontradas em cada subfração estudada. Por meio deste estudo, procurar-se-á conhecer a subfração do minério que gere a maior quantidade de micropelotas maiores e apresente maior consumo de partículas finas e intermediárias, ou seja, tenha o melhor comportamento no processo de microaglomeração.

Os gráficos de partículas primárias versus micropelotas mostram a relação entre a quantidade de partículas primárias existentes e a quantidade de micropelotas geradas após o processo de microaglomeração. O gráfico de evolução das micropelotas mostra a diferença entre as partículas primárias e as micropelotas geradas, onde a porção positiva do gráfico indica que houve aumento das micropelotas do tamanho apresentado; a porção negativa indica que houve uma diminuição.

Assim, haverá crescimento no tamanho da granulometria da mistura, quando ocorrer maior quantidade de micropelotas em relação às partículas primárias nas malhas de 4,76 mm, 2,83 mm e 1,00 mm e ocorrer o inverso em relação às partículas mais finas de 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm. Isso, porque as partículas mais finas contribuem para o crescimento das partículas mais grossas.

Os gráficos do minério blendado serão utilizados para comparar com os gráficos gerados por cada tipo de minério nas suas respectivas subfrações.

VIII.3.1 – MINÉRIO BLENDADO

O comportamento das subfrações nucleantes e aderentes do minério blendado (FIGURA 90) permite inferir que houve um crescimento no tamanho da granulometria dessa mistura, dado pela maior quantidade de micropelotas em relação às partículas primárias nas malhas de 4,76 e pela diminuição na quantidade das partículas mais finas de 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm. Nesse minério houve um maior consumo das partículas primárias de 0,50 mm, que participou na geração das micropelotas mais grossas como partícula aderente.

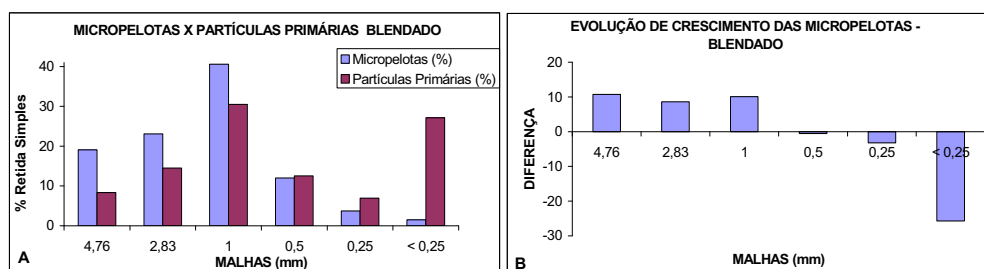


FIGURA 90 – Subfração nucleante e aderente do minério blendado. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

VIII.3.2 – SUBFRAÇÃO NUCLEANTE

O minério HI 0348 apresenta o comportamento de crescimento das micropelotas, dado pelos gráficos da FIGURA 91. Esse minério teve maior geração de micropelotas de 1,00 mm e maior consumo das partículas primárias de <0,25 mm que o minério blendado; com crescimento das micropelotas de 4,76 mm e 2,83 mm foi igual ao blendado.

Na FIGURA 92, observa-se o crescimento das micropelotas do minério GI 0358. Esse minério gerou maior quantidade de micropelotas de 4,76 mm que a de 1,00 mm, semelhante ao minério blendado. As micropelotas de 0,50 mm é maior que as partículas primárias dessa mesma granulação, indicando que essas partículas foram menos consumidas e/ou que as subfrações aderentes nuclearam-se formando essas micropelotas. A quantidade de micropelotas geradas por este minério, é menor que a dos minérios citados anteriormente e também, apresentam menos quantidade de partículas primárias, mais finas, consumidas.

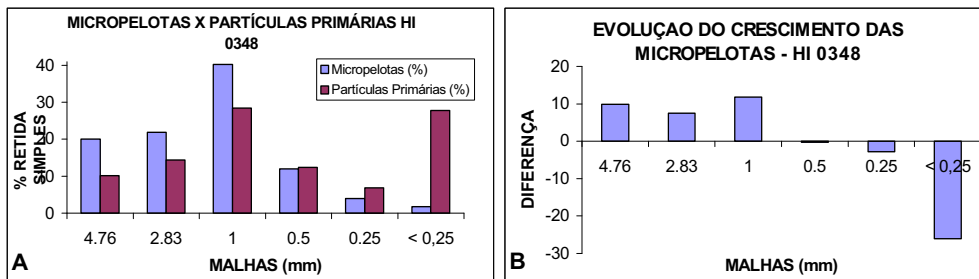


FIGURA 91 – Subfração nucleante do minério HI 0348. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

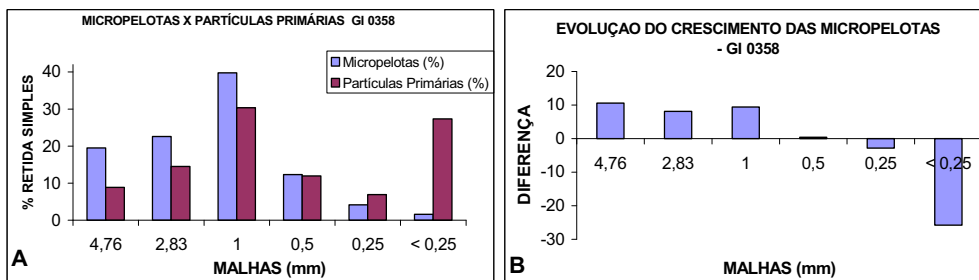


FIGURA 92 – Subfração nucleante do minério GI 0358. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

O comportamento do minério GI 0166 está representado nos gráficos da FIGURA 93. Esse minério mostra um decréscimo na quantidade de micropelotas de 4,76 mm para 1,00 mm, ou seja, há maior quantidade de micropelotas de 2,83 mm que de 1,00 mm. Com relação às demais subfrações, tem comportamento semelhante ao minério blendado. A micropelota de 0,50 mm tem a mesma quantidade das partículas primárias da mistura; indicando que, apesar de parte das partículas primárias desse tamanho tenha sido consumida, houve também a geração de micropelotas desse tamanho pelas partículas primárias mais finas.

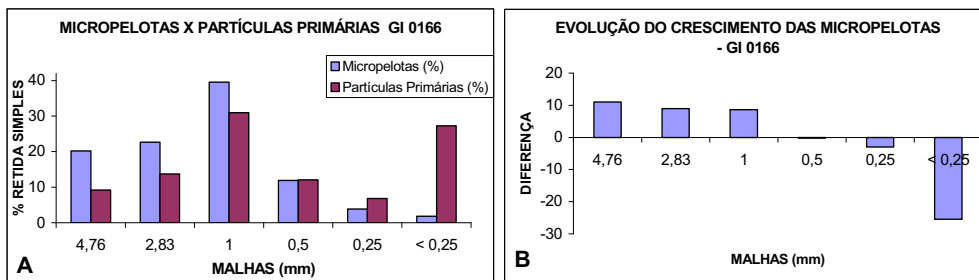


FIGURA 93 – Subfração nucleante do minério GI 0166. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

O minério GI 0137 apresenta o comportamento de microaglomeração da FIGURA 94. Esse minério mostra decréscimo na quantidade de micropelotas de 4,76 mm para a de 1,00 mm, sendo esta última bem menor que nos minérios citados acima. A quantidade de micropelotas de 4,76 mm é bem maior que a gerada pelos minérios já citados. Outra diferença observada é na quantidade de micropelotas de 0,50 mm geradas, que é menor que a quantidade de partículas primárias de mesmo tamanho. Esse comportamento indica que, essa partícula primária participou mais efetivamente na geração de micropelotas maiores. A diferença entre as partículas primárias e as micropelotas mais finas é muito maior que dos minérios acima, indicando que este minério foi o mais eficiente na microaglomeração desses finos.

O minério GI 0165 tem o comportamento de microaglomeração dado na FIGURA 95. Esse minério é o segundo maior gerador de micropelotas de 4,76 mm, com decréscimo na quantidade de micropelotas menores de 2,83 mm e 1,00 mm; mostra também grande consumo das partículas primárias mais finas (0,50 mm,

0,25 mm e <0,25 mm). Ou seja, este minério apresenta um dos melhores desempenhos durante o processo de microaglomeração de suas partículas nucleantes, pois além de gerar mais micropelotas maiores, apresenta um grande consumo de partículas primárias mais finas.

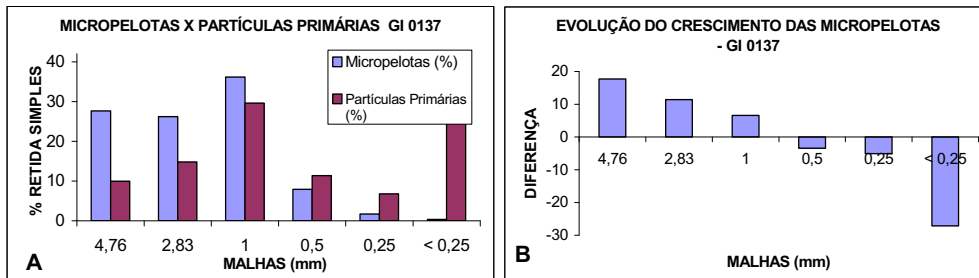


FIGURA 94 – Subfração nucleante do minério GI 0137. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

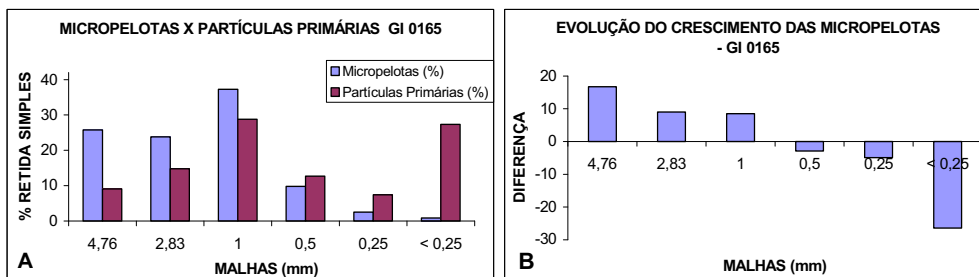


FIGURA 95 – Subfração nucleante do minério GI 0165. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

Os gráficos da FIGURA 96 mostram o comportamento minério GI 0164 no processo de microaglomeração. Esse minério apresentou maior geração das micropelotas de 4,76 mm e o maior consumo das partículas primárias mais finas. Através dessa observação, pode-se dizer que, este minério, além de produzir maior quantidade de micropelotas mais grossas de 4,76 mm e 2,83 mm, produz menor quantidade de micropelotas de 1,00 mm e apresenta maior consumo das partículas primárias mais finas. Com isso conclui-se que é o minério com o melhor comportamento das subfrações nucleantes estudadas.

VIII.3.3 – SUBFRAÇÃO INTERMEDIÁRIA

A FIGURA 97 mostra o comportamento do minério HI 0348 no processo de microaglomeração. As partículas primárias nucleantes e intermediárias desse minério apresentam crescimento no tamanho, como pode ser visto pelas micropelotas geradas. Com relação às partículas aderentes, observa-se que houve um aumento das micropelotas de 0,50 mm, indicando sua menor participação na geração de micropelotas maiores; enquanto que as partículas primárias de 0,25 mm foram parcialmente consumidas; as de <0,25 mm restaram pouca quantidade. Esse minério possui capacidade de microaglomeração superior ao minério blendado e comportamento muito semelhante a da sua subfração nucleante.

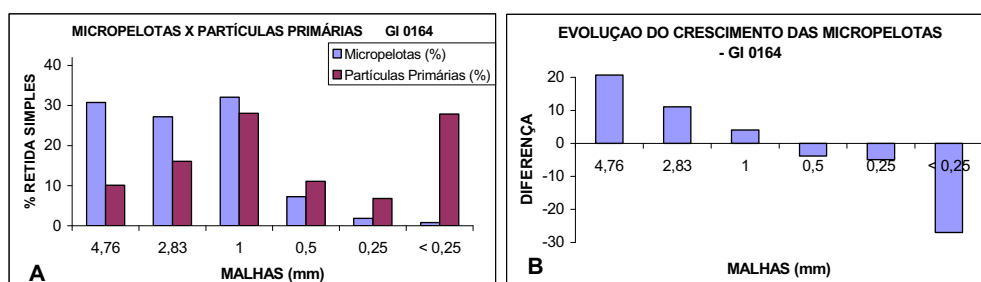


FIGURA 96 – Subfração nucleante do minério GI 0164. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

Na FIGURA 98, tem-se o comportamento do minério GI 0358 no processo de microaglomeração. Esse minério tem decréscimo na quantidade de micropelotas geradas de 4,76 mm para a de 1,00 mm, o que indica ser um minério com boa capacidade de microaglomeração. O minério GI 0358 apresenta comportamento melhor que o minério blendado e sua subfração nucleante, visto

que há maior geração de micropelotas grossas e maior consumo de partículas primárias mais finas.

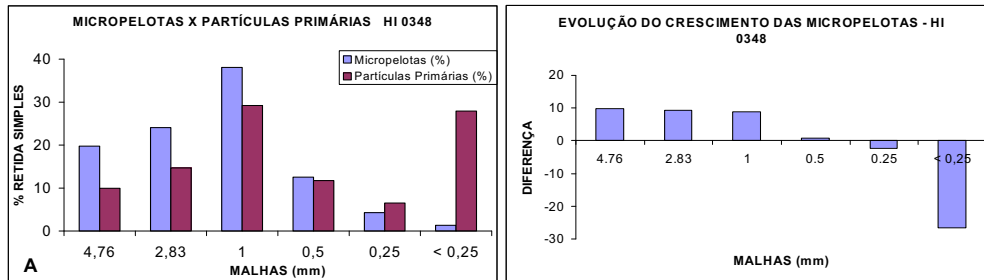


FIGURA 97 – Subfração intermediária do minério HI 0348. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

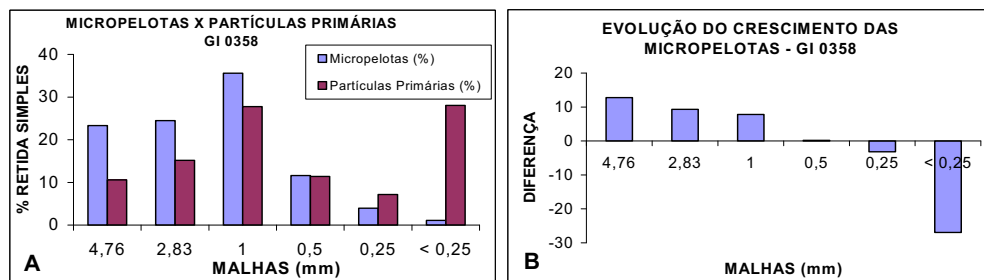


FIGURA 98 – Subfração intermediária do minério GI 0358. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

Os gráficos da FIGURA 99 mostram o comportamento do minério GI 0166 no processo de microaglomeração. Esse minério tem maior quantidade de micropelotas de 4,76 mm geradas e maior consumo de partículas primárias de 0,50 mm. O melhor rendimento no consumo das partículas primárias de 0,50 mm é desse minério.

O minério GI 0137 apresenta o comportamento no processo de microaglomeração mostrado na FIGURA 100. Esse minério é o de menor geração de micropelotas maiores de todas as subfrações de minérios estudadas, é o de maior consumo das partículas primárias de 0,25 mm em relação às de <0,25 mm. Apesar do baixo grau de nucleação das micropelotas maiores, este minério mostra bom consumo das partículas mais finas. Com relação às partículas de 0,50 mm,

esse minério tem um bom comportamento, pois é o que apresenta um dos maiores consumo das mesmas.

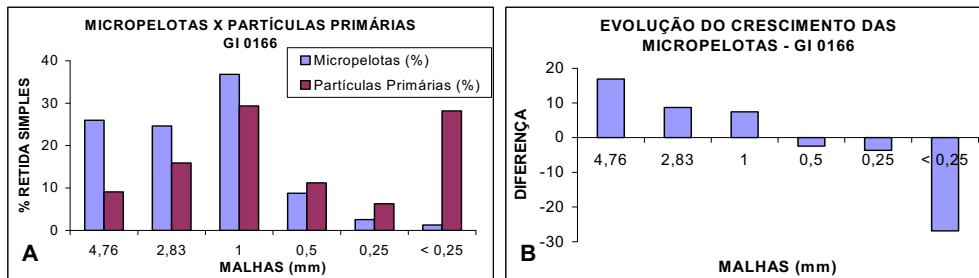


FIGURA 99 – Subfração intermediária do minério GI 0166. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

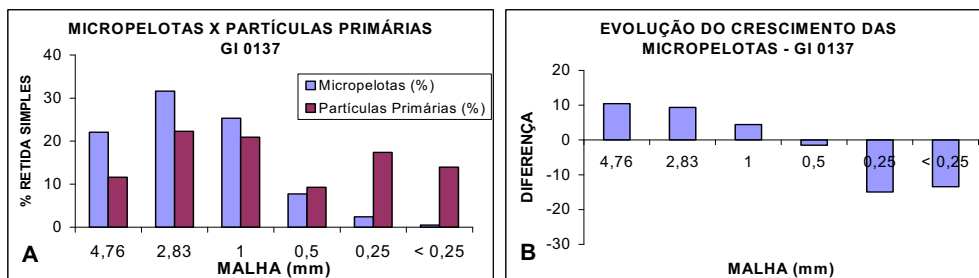


FIGURA 100 – Subfração intermediária do minério GI 0137. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

A FIGURA 101 mostra o comportamento do minério GI 0165 no processo de microaglomeração. Esse minério apresenta bom comportamento de nucleação de micropelotas maiores (o segundo melhor dessa subfração) e bom consumo das partículas mais finas (0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm).

Na FIGURA 102, tem-se o comportamento minério GI 0164 no processo de microaglomeração. Esse minério é o de melhor capacidade de nucleação das micropelotas maiores e de consumo das partículas mais finas (0,25 mm e <0,25 mm). As partículas primárias de 0,50 mm pouco participaram na geração das micropelotas maiores, sendo o único ponto desfavorável desse minério.

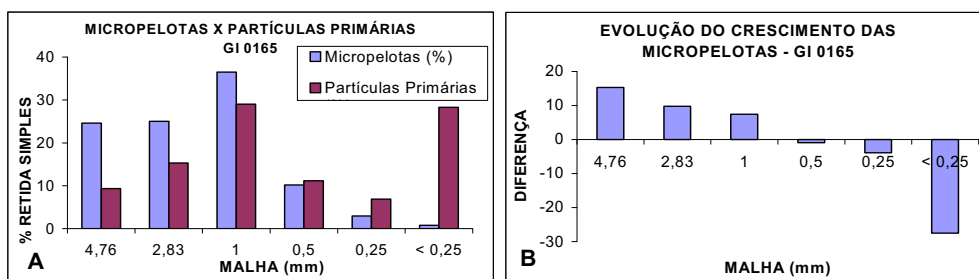


FIGURA 101 – Subfração intermediária do minério GI 0165. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

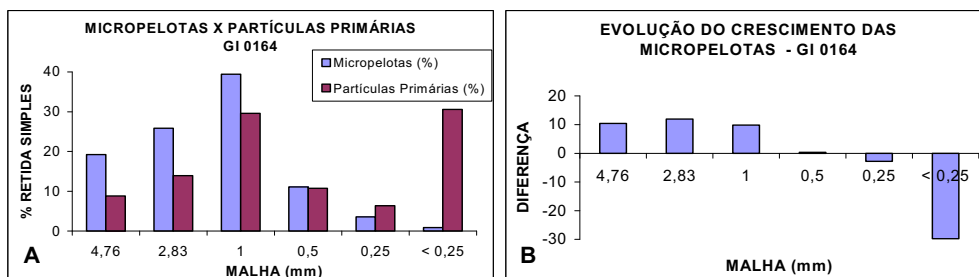


FIGURA 102– Subfração intermediária do minério GI 0164. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

VIII.3.4 – SUBFRAÇÃO ADERENTE

O comportamento do minério HI 0348 no processo de microaglomeração é mostrado na FIGURA 103. Esse minério tem decréscimo das micropelotas de 4,76 mm para a de 1,00 mm e a segunda mais baixa quantidade

desta última micropelota de todos os minérios dessa subfração. Com relação às partículas primárias mais finas (0,50 mm; 0,25 mm e <0,25 mm), é o minério que menos as consumiu, principalmente as partículas primárias aderentes (0,25 mm e <0,25 mm), indicando menor contribuição na geração das micropelotas maiores.

A comparação dessa subfração mostra que tanto o minério blendado quanto as outras subfrações do minério HI 0348 tiveram desempenho de microaglomeração melhor, sendo a subfração intermediária pouco mais eficiente.

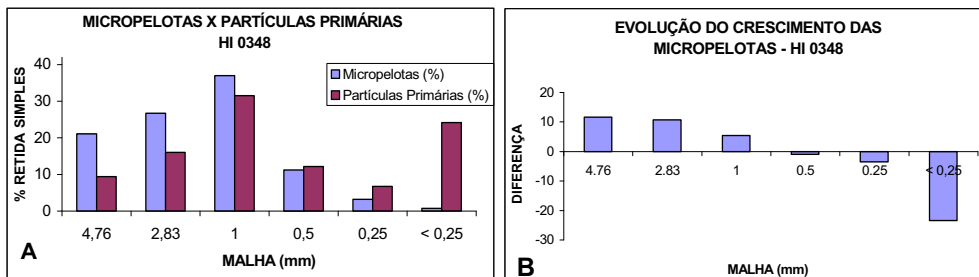


FIGURA 103 – Subfração aderente do minério HI 0348. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

Na FIGURA 104, tem-se o comportamento do minério GI 0358 no processo de microaglomeração. Esse minério tem comportamento intermediário entre as suas subfrações nucleante e intermediária e o minério blendado. A sua capacidade de microaglomeração de micropelotas maiores é melhor que a subfração nucleante; o consumo de partículas primárias mais finas é melhor que o minério blendado e a sua subfração nucleante; com relação à partícula primária de 0,50 mm apresenta maior quantidade de micropelotas que a subfração intermediária e o minério blendado. Na comparação com as outras subfrações desse minério, observa-se que a subfração nucleante é de pior eficiência e a subfração intermediária a melhor, durante o processo de microaglomeração.

Os gráficos da FIGURA 105 mostram o comportamento minério GI 0166 no processo de microaglomeração. Esse minério possui algumas características bem distintas de todos os tipos de minérios e suas subfrações estudadas, nas quais pode-se destacar: a maior quantidade de micropelotas de 4,76 mm e 2,83 mm geradas e a menor quantidade de micropelotas de 1,00 mm e de 0,50 mm. Isso indica que essa subfração desse minério é bem eficiente na

geração de micropelotas maiores e no consumo das subfrações mais finas. É também o minério que apresenta a melhor eficiência de microaglomeração dessa subfração.

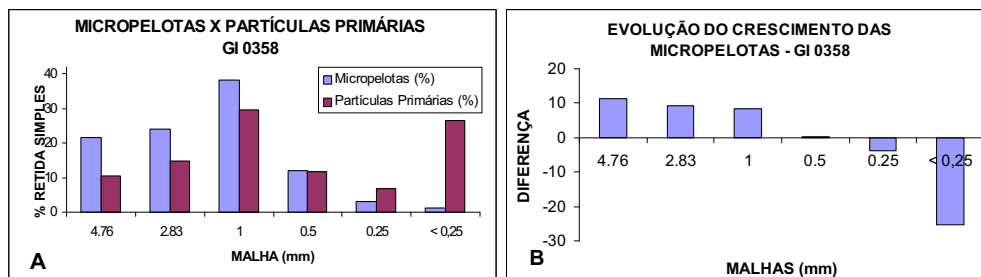


FIGURA 104 – Subfração aderente do minério GI 0358. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

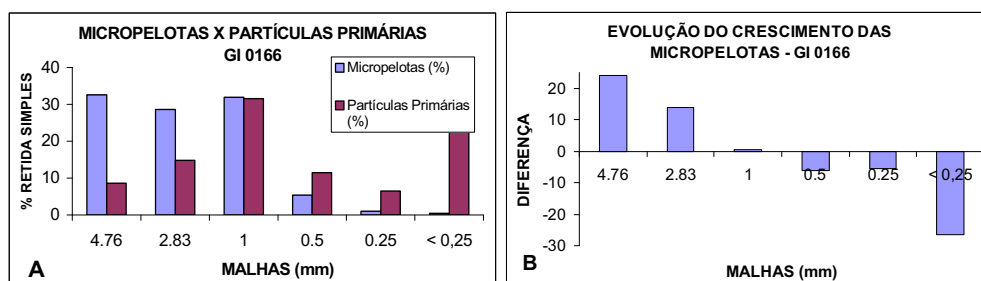


FIGURA 105 – Subfração aderente do minério GI 0166. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

A FIGURA 106 mostra o comportamento do minério GI 0137 no processo de microaglomeração. Esse minério tem a segunda melhor eficiência em microaglomeração das micropelotas maiores, com quantidades bem maiores de micropelotas de 4,76 mm e 2,83 mm e pouca micropelotas de 1,00 mm; também é o minério de maior consumo das partículas primárias mais finas.

O comportamento do minério GI 0165 no processo de microaglomeração é mostrado na FIGURA 107. Esse minério tem comportamento intermediário entre os de melhor desempenho (GI 0166 e GI 0164) e os de pior desempenho (HI 0348 e GI 0358). Há decréscimo na geração das micropelotas de 4,76 mm para de 1,00 mm; partículas primárias ligeiramente menores que as

micropelotas de 0,50 mm, e bom consumo das partículas primárias mais finas. É a subfração desse minério com o pior comportamento de microaglomeração; isso, provavelmente, deve-se à forma lisa de suas partículas primárias.

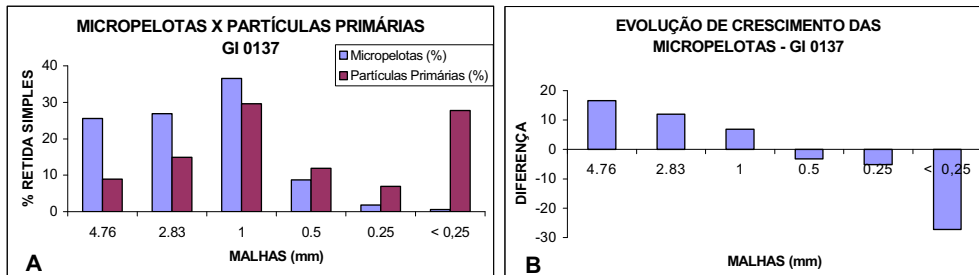


FIGURA 106 – Subfração aderente do minério GI 0137. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

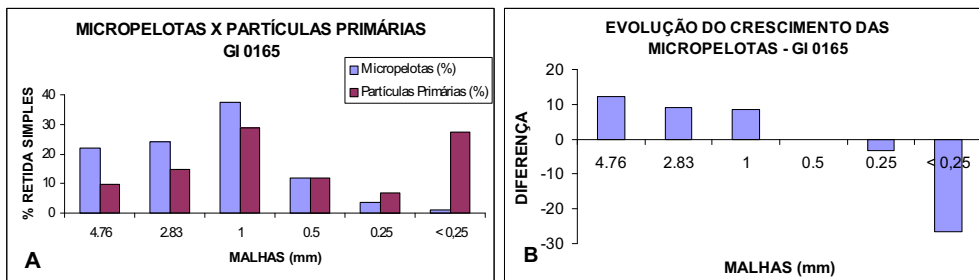


FIGURA 107 – Subfração aderente do minério GI 0165. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

Na FIGURA 108, tem-se o comportamento do minério GI 0164 no processo de microaglomeração. Esse minério tem o terceiro melhor desempenho na microaglomeração das micropelotas maiores e o melhor no consumo das partículas mais finas. Isso mostra que é a mistura do minério com maior consumo dessa subfração aderente. Ou seja, nesse quesito, é a subfração do minério com melhor desempenho no processo de microaglomeração. Na comparação com a subfração nucleante desse minério, essa subfração apresentou maior consumo das partículas mais finas e menor geração de micropelotas maiores; com relação à subfração intermediária mostrou comportamento inverso: foi melhor em nucleação de micropelotas maiores e pior em consumo das partículas mais finas.

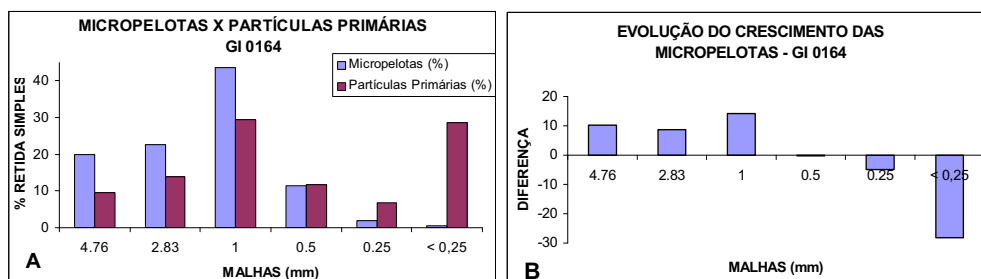


FIGURA 108 – Subfração aderente do minério GI 0164. A) Gráfico da distribuição das micropelotas geradas em relação à distribuição das partículas primárias; B) Gráfico da evolução de crescimento das micropelotas, apresentando a diferença entre as micropelotas geradas e as partículas primárias.

VIII.4 – Considerações do Processo de Microaglomeração

O comportamento de um minério, desejado durante o processo de microaglomeração, é que tenha maior geração de micropelotas maiores e maior consumo das partículas mais finas. Portanto, que o minério propicie o crescimento no tamanho da granulometria da mistura, o que tornará o leito de sinterização mais permeável, auxiliando o processo de sinterização.

A TABELA 48 mostra a proporção de cada subfração para os diferentes tipos de minérios, em relação às micropelotas maiores (MM); comportamento da partícula primária de 0,50 mm; consumo das partículas primárias aderentes.

O minério ideal é aquele que tem: maior quantidade de micropelotas maiores; menor quantidade de partículas primárias de 0,50 mm; maior consumo de suas partículas primárias aderentes.

Características dos Minérios			Subfrações								
			Nucleante (5,00 mm a 1,00 mm)			Intermediária (1,00 mm a 0,25 mm)			Aderente (0,25 mm a < 0,25 mm)		
	Tipo de Minério	Textura Dominante	MM	0,50 mm	PA	MM	0,50 mm	PA	MM	0,50 mm	PA
Blendado			29.3	-0.53	28.8						
HI 0348	Hematítico Hidratado	Microcristalina granular	29	-0.29	28.8	27.8	0.83	28.7	27.7	-0.93	26.9
GI 0358	Hematítico (magnetítico /martítico) Hidratado	Granular	27.1	0.37	28.4	29.7	0.22	30	28.9	0.23	29
GI 0166	Hematítico (magnetítico /martítico) Hidratado	Granular	28.5	-0.16	28.3	33	-2.43	30.5	37.9	-6.10	31.9
GI 0137	Hematítico	Granular	35.5	-3.43	32.1	24	-1.52	28.3	34.5	-3.24	29.8
GI 0165	Hematítico	Granular	34.1	-2.88	31.3	32.3	0.96	31.4	29.9	-0.15	32.1
GI 0164	Hematítico	Lamelar	35.6	-3.83	31.9	32.1	0.33	32.5	33	-0.20	32.9

TABELA 48 – Tabela com as classificações dentre as subfrações do desempenho de cada tipo de minério, em relação à geração de micropelotas maiores (MM) e consumo de partículas aderentes mais finas (PA). As letras em azul mostram os resultados obtidos pelo minério blendado; as letras em negrito indicam os melhores resultados de cada subfração e em vermelho e itálico são os piores. Os quadros em cinza são os melhores e os piores resultados de todos os níveis de queima.

A geração das micropelotas maiores, nas subfrações nucleantes, mostra que os minérios mais hematíticos apresentam comportamento de microaglomerações melhores que o minério blendado e os minérios com minerais hidratados. Esses últimos têm comportamento pior que o minério blendado.

A subfração intermediária estudada não demonstra diferenciação tão clara quanto à subfração nucleante. No entanto, os minérios GI 0166 e o GI 0164, dessa subfração tiveram resultados melhores que os da suas respectivas subfrações nucleantes. O minério GI 0166 tem um melhor desempenho na formação de MM e de partículas de 0,50 mm; já o GI 0164 tem maior consumo de partículas primárias aderentes. Apesar da menor participação da subfração intermediária na mistura, os minérios dessa subfração foram os que apresentaram

os piores comportamentos de todo estudo: menor nucleação de micropelotas maiores (GI 0137) e o pior consumo de partículas primárias de 0,50 mm (GI 0165).

A subfração aderente dos minérios estudados demonstra que o minério GI 0164 foi o que apresentou o maior consumo de partículas primárias aderentes de todos os níveis de queima. Enquanto que o minério GI 0166 foi o que teve a maior quantidade de micropelotas maiores e o maior consumo das partículas primárias de 0,50 mm. E o minério HI 0348 teve o menor consumo de partículas primárias aderentes de todo o estudo.

O comportamento melhor das subfrações aderentes está associado ao tipo de minérios, cujas características intrínsecas são responsáveis pelas diferenças de comportamento encontradas. Enquanto que o comportamento abaixo do esperado das subfrações intermediárias, mostra que a sua presença interfere diretamente na eficiência do processo, apesar de sua menor participação na mistura.

Dentre as subfrações nucleante, intermediária e aderente de todos os minérios estudados, avalia-se que o minério com maior crescimento das micropelotas foi o minério GI 0166 na sua subfração aderente. Esse minério teve também maior contribuição das partículas primárias de 0,50 mm. O minério com maior consumo de partículas primárias aderentes foi o GI 0164 na sua subfração aderente.

O presente estudo permite deduzir que uma mistura entre os dois tipos de minérios (ex: GI 0166 e GI 0164) pode produzir um melhor resultado no processo de microaglomeração. Pois, é observado que, o GI 0166 apresentou melhor desempenho na subfração intermediária e aderente, mas com menor crescimento das micropelotas na subfração nucleante; enquanto que o minério GI 0164 teve desempenho melhor na subfração nucleante.

VIII.5 – Ensaios de sinterabilidade

Nesse item serão discutidos os resultados obtidos nos ensaios de sinterabilidade dos 19 níveis de queima, durante o processo de sinterização, que se encontram resumidos na TABELA 49.

	Queima	H ₂ O (%)	Coque (%)	PSC (kg)	PB (kg)	Tempo (min.)	Retorno <5mm (%)	Retorno Total (%)	Coke Rate (kg/t)	Produt. (t/h/m ²)
	Blendado	6,00	3,40	57,59	56,59	16,53	17,82	24,06	49,28	1,924
NUCLEANTE	HI 0348	6,00	3,30	56,17	55,40	15,60	19,95	26,20	49,20	1,933
	GI 0358	6,00	3,30	57,55	56,63	17,30	18,10	24,35	47,94	1,861
	GI 0166	7,00	3,50	52,10	51,03	14,23	19,18	25,43	52,43	1,955
	GI 0165	6,00	3,40	61,28	60,34	17,43	18,26	24,51	49,25	1,943
	GI 0137	6,00	3,30	60,22	59,41	16,90	18,35	24,60	47,77	1,970
	GI 0164	6,00	3,40	60,32	59,47	17,17	18,73	24,97	49,52	1,931
	ADERENTE	HI 0348	6,00	3,40	56,27	55,35	15,2	19,26	25,51	50,36
GI 0358		6,00	3,30	57,21	56,37	17,3	18,53	24,78	48,17	1,813
GI 0166		7,00	3,5	58,10	56,89	16,0	18,18	24,43	51,23	1,991
GI 0165		6,00	3,40	56,91	55,99	15,47	18,04	24,29	49,40	2,027
GI 0137		6,00	3,30	59,32	58,46	16,53	20,03	26,29	49,10	1,929
GI 0164		6,00	3,30	57,78	56,71	17,33	18,65	24,90	48,50	1,815
INTERMEDIÁRIO	HI 0348	6,00	3,30	56,33	54,98	15,97	19,41	25,66	49,34	1,881
	GI 0358	6,00	3,20	56,52	55,22	16,00	18,42	24,67	47,25	1,914
	GI 0166	7,00	3,40	56,56	55,21	15,90	17,78	24,03	49,80	1,944
	GI 0165	6,00	3,30	57,88	56,60	15,87	19,32	25,57	49,23	1,957
	GI 0137	6,00	3,20	56,14	54,93	15,50	19,47	25,72	47,92	1,954
	GI 0164	6,00	3,30	57,76	56,41	16,00	19,63	25,88	49,56	1,924

TABELA 49 – Tabela com os ensaios de sinterabilidade dos 19 níveis de queima obtidos durante o processo de sinterização dos diferentes tipos de minérios estudados. (PSC- Peso Seco Carregado; PB – Peso do Bolo).

Os dados da tabela mostram que o minério GI 0166, em todas as suas subfrações, foi o único minério a utilizar umidade de 7%, enquanto que os demais minérios utilizaram 6%. Apesar de ser hematítico martítico hidratado, esse minério necessitou de mais água para a realização do processo de microaglomeração. Isso indica que a presença de água na estrutura do mineral não

interfere nesse processo, talvez até prejudique, pois grande quantidade de água diminui a eficiência do processo de sinterização.

O combustível coque utilizado apresenta uma variação de 3,20 a 3,50 %. Os minérios magnetíticos necessitam de menos combustíveis, pois a transformação de Fe_4O_3 para Fe_2O_3 é uma reação exotérmica, auxiliando no calor do processo de sinterização. Os minérios GI 0358 e GI 0137, nas suas subfrações intermediárias, foram os que menos utilizaram combustível; o minério que mais utilizou foi o GI 0166 nas suas subfrações nucleantes e intermediárias. Os demais minérios e suas subfrações utilizaram 3,30 ou 3,40 %.

O peso seco carregado (PSC) das misturas dos 19 níveis de queima, realizados no presente estudo, encontra-se melhor visualizado no GRÁFICO 31. Observa-se que o PSC dos níveis de queima da subfração nucleante é o que apresenta a maior variação; isso ocorre, provavelmente, devido à sua participação na mistura ser maior que das outras subfrações.

Na subfração nucleante, os minérios hematíticos apresentam PSC maior que os minérios hidratados; como pode ser visto, o minério mais hidratado é o que apresenta o menor PSC.

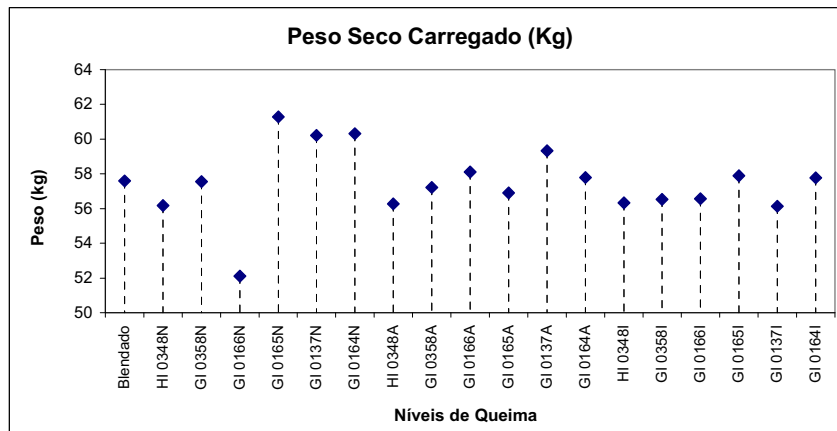


GRÁFICO 31 – Gráfico do Peso Seco Carregado (PSC) das misturas utilizadas nos 19 níveis de queima realizados: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

Os níveis de queima da subfração intermediária apresentam comportamentos com menores diferenciações, que podem ou não ser associados às características geológicas dos minérios, devido à sua pequena participação dentro da mistura, que representa apenas 15%. Assim, as características

geológicas podem ser obliteradas pelo maior volume dos outros componentes da mistura.

Com relação à subfração aderente, pode ser observado que os minérios hidratados e o GI 0137 (baixo grau de deformação) apresentam um PSC menor e muito próximos, enquanto que os minérios hematíticos, com maior grau de deformação, apresentam um PSC mais alto.

O minério com o menor PSC é o GI 0166 da subfração nucleante, além de ser hidratado é bastante poroso. Esse nível de queima (GI 0166N) é o que apresenta menor tempo de sinterização, maior *coke rate*, sem prejudicar a produtividade. Apesar de não prejudicar a produtividade, essas características afetaram os testes de qualidade do sinter gerado, como poderá ser visto posteriormente.

O minério GI 0165N apresentou o maior PSC, provavelmente devido à sua composição e porosidade menor de suas partículas primárias, pois é composto basicamente de Hr a Hl; forma um minério mais compacto.

A densidade de carga é medida pelo PSC do minério e o volume da panela de sinterização, mostrando, assim, uma correlação direta entre o PSC e a densidade de carga para cada nível de queima.

O tempo de sinterização e a densidade de carga apresentam uma correlação positiva (GRÁFICOS 32A; 32B; e 32C), principalmente, no caso das subfrações nucleantes e aderentes; em menor escala para a subfração intermediária.

No GRÁFICO 32A, a correlação entre o tempo de sinterização e a densidade de carga da subfração nucleante mostra uma correlação positiva. Esse comportamento está associado ao tipo de minério estudado: quanto mais hidratado for o minério, como o GI 0166, menos denso será e sinterizará mais rapidamente. O inverso também é válido, quanto mais compacto e anidro for o minério, como o GI 0165, ele será mais denso e sinterizará mais lentamente.

No caso da subfração aderente, observa-se que também há correlação positiva entre a densidade de carga e o tempo de sinterização. No entanto, apresenta-se numa faixa mais estreita que a subfração anterior, indicando que há uma menor diferença entre os extremos, devido à quantidade utilizada do minério ser menor.

No GRÁFICO 32B, observa-se que os minérios GI 0358 (9) e GI 0164 (13) se encontram deslocados da linha de tendência. Isso, provavelmente, deve-se ao fato de o primeiro ser um minério mais magnetítico, cujo aumento de tempo deve-se à transformação da Mg para hematita e vice-versa durante o processo de sinterização; o segundo é um minério hematítico, no processo de microaglomeração; gerou maior quantidade de micropelotas de 1,00 mm, que pode ter tornado o leito de sinterização menos permeável, dificultando a passagem do ar, aumentando assim, o tempo de sinterização.

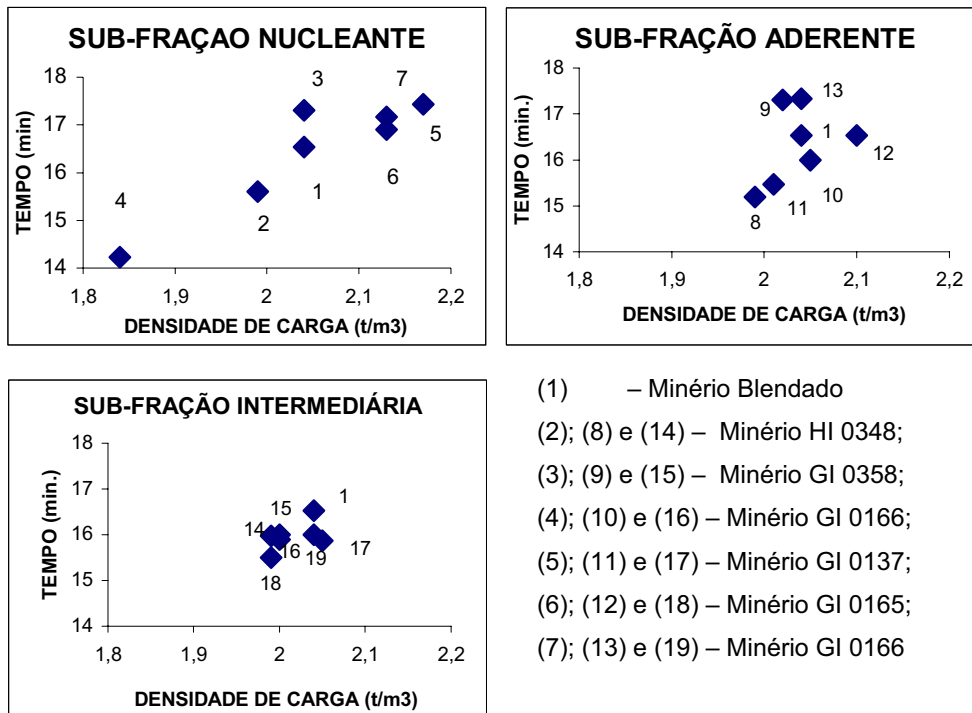


GRÁFICO 32 – (A) Gráfico apresentando a densidade de carga contra o tempo da subfração nucleante. (B) Gráfico apresentando a densidade de carga contra o tempo da subfração aderente. (C) Gráfico apresentando a densidade de carga contra o tempo da subfração intermediária.

Os demais minérios da subfração aderente apresentam uma correlação positiva entre o tempo de sinterização e a densidade de carga. É observado também que minério com distribuição homogênea nos diferentes tamanhos de micropelotas maiores possui maior permeabilidade no leito de sinterização; menor tempo de sinterização e melhor densidade de carga, como o HI

0348; o que produz maior quantidade de apenas um tamanho de micropelotas; apresenta a relação contrária, como o GI 0137.

Na subfração intermediária, pode-se identificar grupos com correlações diferentes, indicando que apesar de terem densidades diferentes, apresentam pouca diferença no tempo de sinterização (GRÁFICO 32C), cuja distribuição dos tipos de minérios encontram-se mais concentrados.

Observa-se no GRÁFICO 32C: (i) os minérios com cristais menores, menor grau de deformação, apresentam tempo de sinterização e densidade de carga menores; (ii) aqueles cristais maiores, maior grau de deformação, apresentam a relação inversa; (iii) os minérios que apresentam maiores quantidades de hidratados e Mgs apresentam um comportamento intermediário entre os citados.

O GRÁFICO 33 apresenta o *coke rate* de cada nível de queima realizado durante o processo de sinterização. A variação na quantidade do combustível utilizada, por cada nível de queima, é feita de acordo com o balanceamento dos finos de retorno introduzido e o produzido, que devem ser iguais, com uma tolerância de 10% em relação à fração < 5 mm.

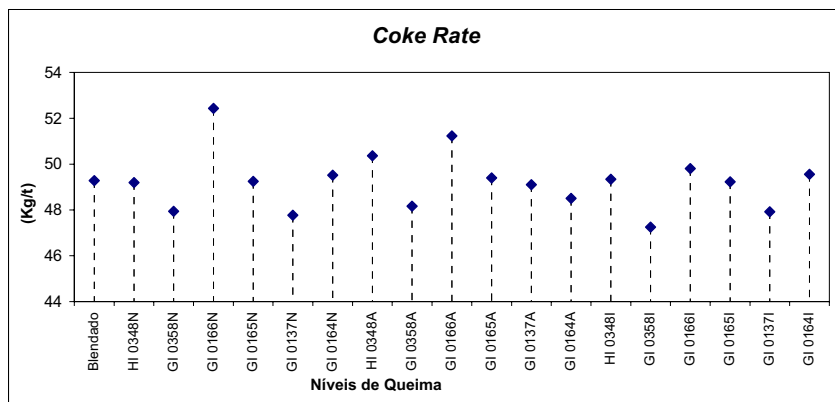


GRÁFICO 33 – Gráfico com o *coke rate* utilizado nos 19 níveis de queima: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

Assim pode-se observar que o minério GI 0166, em todas subfrações, é o que apresenta o maior *coke rate*. É um minério que deve utilizar maior quantidade de combustível, para aumentar a resistência do sinter gerado e para obter a mesma taxa de retorno total que os outros minérios. Esse maior teor

de *coke rate*, provavelmente, deve estar relacionado ao alto teor de perda ao fogo desse minério.

Por outro lado, o minério que apresenta o menor *coke rate* é o GI 0358 em todas subfrações, isto se deve, ao fato desse minério ter Mg como mineral secundário; sua transformação para a hematita faz-se com que haja liberação de calor, auxiliando no processo.

Os níveis de queima da subfração intermediária são os que têm menor *coke rate*; novamente, deve-se à menor contribuição dos tipos de minérios nas misturas.

A porcentagem de finos de retorno utilizada na mistura corresponde a 25% do total, possui a seguinte distribuição granulométrica: 25% de material na faixa de 5 mm a 10 mm e 75% de 0 mm a 5 mm. Esses valores correspondem à granulometria dos finos de retorno industrial praticada pela Usiminas .

A correlação entre os finos de retorno < 5mm e o retorno total deve ter uma correlação positiva (GRÁFICO 34).

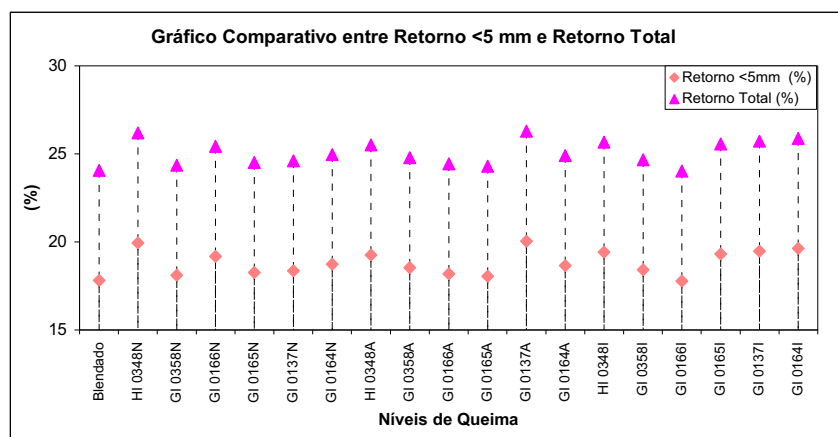


GRÁFICO 34 – Gráfico comparativo entre retorno <5 mm e retorno total das misturas utilizadas em todos níveis de queima: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

Os minérios hematíticos (GI 0137, GI 0165 e GI 0164) possuem a mesma correlação em todas subfrações, com aumento na quantidade de finos de retorno do menos deformado para o mais deformado, com exceção da subfração aderente do minério GI 0137.

Os minérios hidratados mostram uma correlação para as subfrações aderentes e intermediárias, com a diminuição na quantidade de finos do minério menos deformado para o mais deformado e com maior grau de hidratação. Na subfração nucleante, o minério HI 0348 é o que apresenta a maior quantidade; já o minério GI 0358 a menor quantidade. Não mostra a mesma correlação das outras subfrações, visto que o minério GI 0166 é o que tem a segunda maior quantidade de finos de retorno.

A quantidade de combustível é determinada também em função da quantidade de finos de retorno gerada para cada mistura. Entretanto, essa correlação não é direta, visto que há outros fatores associados ao teor de *coke rate*, além dos finos de retorno: daí a não linearidade entre os GRÁFICOS 33 e 34.

A produtividade de cada nível de queima permite definir que a subfração aderente tem maior variação, enquanto a intermediária é a mais estável (GRÁFICO 35). Dentre a subfração aderente o minério GI 0165 dessa subfração é o que apresenta a maior produtividade, enquanto que os minérios GI 0358A e GI 0164A são os que apresentam as menores produtividades de todos os níveis de queima estudados.

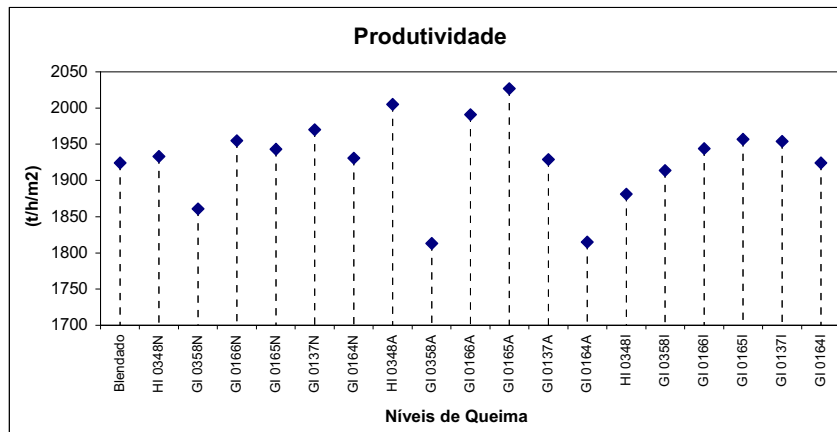


GRÁFICO 35 – Gráficos com a produtividade dos 19 níveis de queima realizados: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

O baixo valor de produtividade do minério GI 0358 deve-se à quantidade de FeO da Mg, que favorece a formação de fase líquida durante o processo de sinterização, diminuindo a permeabilidade do leito.

No GRÁFICO 35, observa-se que a subfração aderente apresenta os minérios com a maior e menor produtividade. Essa variação na produtividade deve estar associada à capacidade de cada tipo de minério aderir nas partículas primárias nucleantes, formando micropelotas mais resistentes e auxiliando o processo de sinterização com aumento de sua eficiência e, conseqüentemente, maior produtividade.

Assim pode-se dizer que essa maior variação da subfração aderente está relacionada às características intrínsecas dos diferentes tipos de minérios que refletem no seu comportamento durante o processo de microaglomeração e sinterização de forma mais direta. Enquanto, a subfração nucleante nessa fase geralmente permanece inalterada, essas partículas maiores não são fundidas pelo tipo de sinter gerado ser heterogêneo.

VIII.6 – Ensaio de Caracterização do Sinter

Após a produção do bolo de sinter, esse passa por processo de caracterização, visando a conhecer as suas características químicas, físicas, metalúrgicas, mineralógicas e estruturais.

VIII.6.1 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SÍNTERES OBTIDOS

A análise química dos 19 sinteres produzidos em escala piloto foi realizada na Unidade de Química Analítica do Centro de P&D da Usiminas, segundo procedimento interno padrão de análise. As análises encontram-se no ANEXO IV.

VIII.6.2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SÍNTERES OBTIDOS

A caracterização física dos sinteres limitou-se às avaliações das resistências ao impacto e à abrasão, com base nos procedimentos normalmente adotados no Laboratório Piloto de Sinterização da Usiminas.

Esses procedimentos têm como objetivo simular os efeitos de manuseio e transporte sobre o grau de estabilização granulométrica do sinter industrial, visando a conhecer a resistência do sinter produzido.

VIII.6.2.1 – Shatter Test – Teste de Queda

Os testes de queda foram feitos utilizando a metodologia acima citada, onde é medida a fração de material retida > 10 mm, especificada no item I.2.5.2.5. Os resultados obtidos encontram-se dispostos no GRÁFICO 36, conforme pode ser visto abaixo.

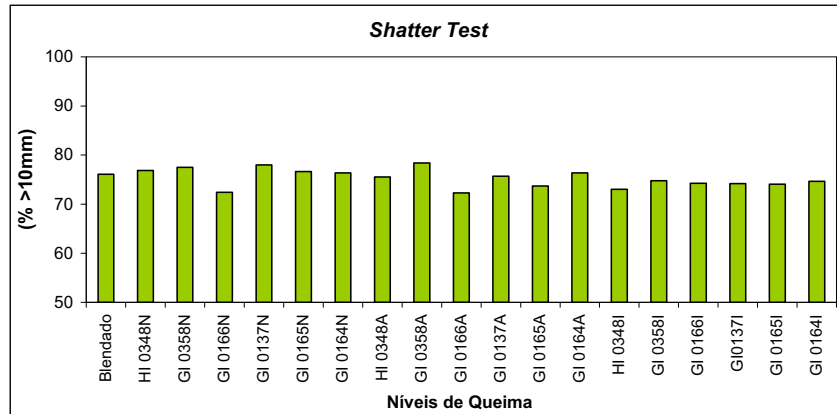


GRÁFICO 36 – Resultados dos testes de queda dos 19 níveis de queima realizados: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

Os sínteres que apresentam quantidades menores de material na fração > 10 mm indicam que são frágeis, porquanto geram maior quantidade de finos e mostram baixa resistência ao impacto. As misturas das subfrações nucleantes e aderentes apresentam uma variação mais visível nos resultados deste teste, enquanto que as misturas da subfração intermediária não apresentam variação significativa.

Apesar dos níveis de queima realizados não apresentarem grandes variações, as misturas da subfração nucleante são as que produzem sínteres mais resistentes, comparados com o minério blendado, com exceção do minério GI 0166, cujo motivo será apresentado abaixo.

As misturas da subfração aderente, apesar de apresentarem uma grande variação na resistência dos sínteres obtidos, são menores ou iguais às do minério blendado. O minério GI 0358 é a única exceção, pois é o sínter mais resistente de todos os níveis de queima realizados. Os sínteres obtidos das subfrações intermediárias mostram que sua resistência é um pouco menor que o minério blendado.

O minério GI 0166, tanto na sua subfração nucleante quanto aderente, é o que apresenta menor grau de resistência ao impacto; isso ocorre devido a sua maior variação na composição mineralógica e pelo alto grau de hidratação, resultando num alto PPC. O minério GI 0358, na sua subfração aderente, é o que apresenta o maior índice, isso provavelmente ocorre também, devido a presença de Mg e a sua forma de ocorrência, cuja presença de FeO auxiliou na formação da fase líquida, tornando o sinter mais resistente.

Observa-se que os minérios, estudados nas suas diferentes subfrações, apresentam comportamentos adequados para uso em alto-forno, visto que são bastante resistentes aos testes de quedas aplicados. Apesar de a variação existente de 6,12% entre o minério mais e o menos resistente, ser significativa, o minério menos resistente encontra-se dentro da faixa aceitável para seu uso.

VIII.6.2.2 – *Tumbler Test* – Teste de Tamboramento

Os testes de tamboramento foram feitos, utilizando a metodologia acima citada, onde é medida a fração de material retida > 6,35 mm, especificada no item I.2.5.2.5. Os resultados obtidos encontram-se dispostos no GRÁFICO 37.

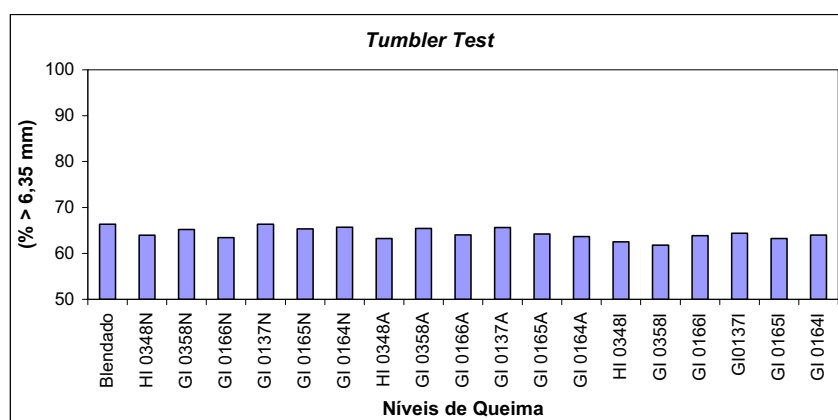


GRÁFICO 37 – Resultados dos testes de tamboramentos dos 19 níveis de queima realizados: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

Os níveis realizados de queima apresentam variações tanto no grupo das subfrações nucleantes quanto nas aderentes; formam dois grupos: (i) o primeiro, com comportamento semelhante ao minério blendado, apresenta maior resistência ao tamboramento; (ii) o segundo apresenta menor resistência ao mesmo.

Os níveis de queima mais resistentes são os do minério blendado e o GI 0137 na subfração nucleante e o de menor resistência é o minério GI 0358 da subfração intermediária; no entanto, essa diferença daquele de maior para o de menor resistência é de apenas 4,55%, indicando que, com relação à resistência ao teste de tamboramento, os minérios apresentam comportamentos bastante próximos.

Assim, pode-se dizer que os minérios estudados nas diferentes subfrações são resistentes aos testes de tamboramentos aplicados, podendo ser utilizados nos altos-fornos.

VIII.6.3 – CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DOS SÍNTERES OBTIDOS

VIII.6.3.1 – Índice de Degradação sob Redução

Os testes foram realizados baseados nos procedimentos da *Nippon Steel Corporation*, utilizando-se a temperatura de 500° C, medindo a quantidade de material de < 2,83 mm, cuja metodologia encontra-se especificada no capítulo I (metodologia).

Os níveis de queima estudados apresentam pequenas variações: as subfrações nucleantes e aderentes com as maiores variações, enquanto que os minérios da subfração intermediária apresentam comportamentos muito semelhantes (GRÁFICO 38).

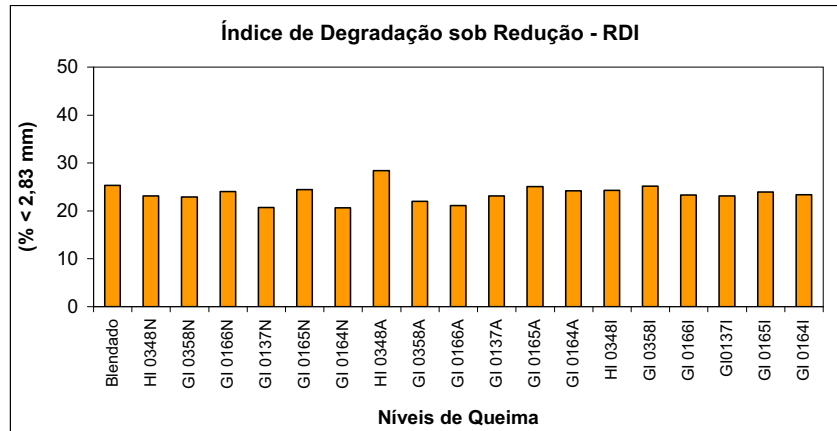


GRÁFICO 38 – Resultado de RDI dos 19 níveis de queima realizados: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

Na subfração nucleante, os minérios GI 0137 (20,74%) e GI 0164 (20,65%) apresentam os melhores índices de RDI, tendo o último minério o mais baixo de todos os níveis de queima. Os demais minérios dessa subfração têm valores intermediários entre esses menores e o minério blendado (25,35%).

Os minérios da subfração aderente mostram valores mais variáveis de RDI, tendo o minério HI 0348 o mais alto valor, 28,4%, e o minério GI 0166 o menor valor 21,12%. Aqui percebe-se que as subfrações aderentes dos minérios contribuem fortemente para a resistência do sínter gerado, ou seja, por ser minérios de tipologias diferenciadas que compõem as camadas externas das micropelotas, são responsáveis pelas gerações das fases líquidas durante o processo de sinterização. As fases sólidas geradas podem ter maior ou menor resistência, dependendo do material que as formar, influenciando assim, no melhor desempenho ou não do sínter quando submetido ao RDI.

A homogeneidade do desempenho dos minérios das subfrações intermediárias, mais uma vez, indica que a sua baixa percentagem na mistura não interfere nesses índices, que se encontram bastante próximos ao do minério blendado.

A diferença entre o melhor e o pior nível de queima é de 7,75%. Este comportamento diferenciado, certamente, influi no desempenho do sinter gerado no alto-forno. Isso indica que o minério com alto índice de RDI não é adequado ao uso no alto-forno.

VIII.6.3.2 – Índice de Redutibilidade

Este índice indica: quanto maior for o seu valor, menor será o volume de escória primária gerada e maior a permeabilidade na zona coesiva dentro de um alto-forno. O ensaio adotado para determinação desse índice é o JIS M 8713, utilizando a temperatura de 900° C com a composição do gás redutor de 30% de CO e 70% de N₂.

Os resultados apresentados mostram variações em todas as subfrações estudadas, cada qual com um comportamento diferenciado em relação ao minério blendado e aos próprios minérios (GRÁFICO 39).

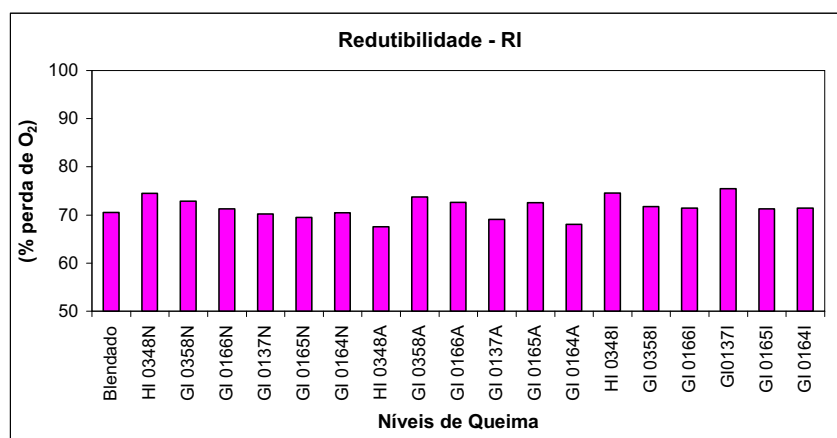


GRÁFICO 39 – Resultado do índice de redutibilidade dos 19 níveis de queima realizados: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

As subfrações nucleantes apresentam dois grupos: (i) o primeiro muito semelhante ao comportamento do minério blendado, representado pelos minérios mais hematíticos; (ii) o segundo apresenta-se com índices maiores que o blendado, representados pelos minérios HI 0348, GI 0358 e GI 0166 que são hidratados, decrescendo do primeiro para o terceiro.

Os minérios da subfração aderente também apresentam dois grupos, mas sem correlação com a mineralogia. O primeiro grupo, representado pelos minérios GI 0358, GI 0166 e GI 0165, tem índice de redutibilidade maior que o minério blendado. E o segundo grupo, composto pelos minérios HI 0348, GI 0137 e GI 0164, apresenta índices menores, mas próximos ao minério blendado.

O minério HI 0348 dessa subfração apresenta o menor valor de todos os níveis de queima seguido do minério GI 0164. Esses minérios são hematíticos, mas diferem na forma, no tamanho e no grau de cristalinidade dos cristais de hematita; os valores baixos encontrados, portanto, devem-se a outros fatores.

Na subfração intermediária encontra-se o minério com maior índice de redutibilidade, o minério GI 0137, apresenta índices maiores em todos os minérios comparando-o às outras duas subfrações. Essa subfração apresenta a relação inversa da subfração aderente, ou seja, os minérios com valores maiores na subfração aderente, nessa subfração, apresenta-se menor e vice-versa.

VIII.6.4 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS SÍNTERES A ALTAS TEMPERATURAS

A capacidade de redução das cargas metálicas está diretamente relacionada ao seu comportamento na zona coesiva. A intensidade de redução, à qual a carga é submetida, tem papel decisivo no processo de início de

amolecimento. Portanto, é fundamental para o entendimento do comportamento da carga metálica a altas temperaturas, conhecer o seu grau de redução momentos antes de ter início o processo de amolecimento.

VIII.6.4.1 – Avaliação da redutibilidade (grau de redução)

Esta determinação foi possível através da interrupção do ensaio de amolecimento e fusão a 1000°C (GRÁFICO 40), temperatura que precede o início de amolecimento e, por diferença de peso, estima-se o grau de redução neste momento, representado por RI_{1000} .

Os ensaios de redutibilidade sob altas temperaturas mostram comportamentos ligeiramente diferentes dos ensaios de redutibilidade segundo a norma JIS M 8713.

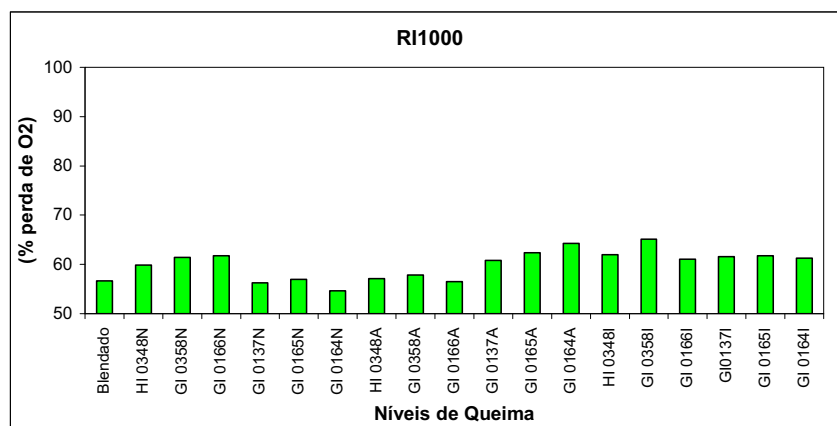


GRÁFICO 40 – Resultado do índice de redutibilidade a 1000° C dos 19 níveis de queima realizados: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

A subfração nucleante dos minérios apresenta uma pequena variação, sendo possível separar em dois grupos, que apresentam uma pequena

diferença em relação ao minério blendado. O primeiro grupo (GI 0165, GI 0137 e GI 0164) contém uma perda menor de O_2 ; o segundo (HI 0348, GI 0358 e GI 0166), uma perda maior. Essas diferenças podem estar relacionadas à composição mineralógica dos minérios envolvidos que, no primeiro grupo, são representados por minérios basicamente hematíticos; enquanto o segundo, por minérios hematíticos com minerais hidratados associados.

Os minérios da subfração aderente também podem ser divididos em dois grupos, compostos pelos mesmos minérios que os da subfração nucleante. No entanto, apresentam uma relação inversa aos minérios da subfração nucleante. Ou seja, o grupo que apresenta uma perda menor de O_2 , nessa subfração, é o mesmo que apresenta uma perda maior da subfração nucleante e vice-versa. Nesse caso, devido ao material estudado ser o que reveste as partículas primárias nucleantes, pode-se deduzir que os minérios com participação de Mh formam uma resistência maior à passagem de O_2 no processo. Enquanto que os minérios mais hematíticos permitem a passagem de O_2 com mais facilidade.

Na subfração intermediária avalia-se que os minérios apresentam um comportamento bastante homogêneo, provavelmente, devido a sua pequena participação na mistura.

O grau de resistência à passagem de O_2 durante o processo de redução sob altas temperaturas mostra que a diferença entre o mais e o menos resistente é muito pequena. Assim, dependendo do contexto, pode-se considerar que os minérios de todos níveis de queima apresentam comportamento semelhante.

VIII.6.4.2 – Ensaio de amolecimento e Fusão

Nesta fase, objetivou-se avaliar as características de amolecimento e fusão dos diferentes sinteres quando submetidos a condições termoredutoras semelhantes às encontradas no interior do alto-forno. Desenvolvido no Centro de P&D da Usiminas, o ensaio permite o monitoramento contínuo da contração do leito

e da perda de pressão do gás. A descrição do equipamento e o procedimento de ensaio foram detalhadamente apresentados em relatório de estudo anterior PIMENTA et al. (2000).

Os parâmetros que definem as propriedades a altas temperaturas da carga e os índices escolhidos para representá-los encontram-se descritos na metodologia e as condições utilizadas estão listadas na TABELA 05.

O GRÁFICO 41 indica a variação da temperatura durante os ensaios de amolecimento e fusão. A diferença da TF e TA permite estimar a espessura da zona coesiva. Busca-se, então, a carga metálica ideal: a que apresenta as maiores temperaturas de amolecimento e fusão, mantendo uma diferença reduzida entre elas (DAWSON, 1993). A garantia de uma zona de preparação ampla e uma zona coesiva mais estreita, resulta em economia de combustível e baixa perda de pressão do gás redutor na zona coesiva. PIMENTA et al. (2002) observaram uma clara dependência das temperaturas de início de amolecimento com os teores de SiO_2 e Al_2O_3 : essa temperatura será maior quanto menor o teor desses compostos.

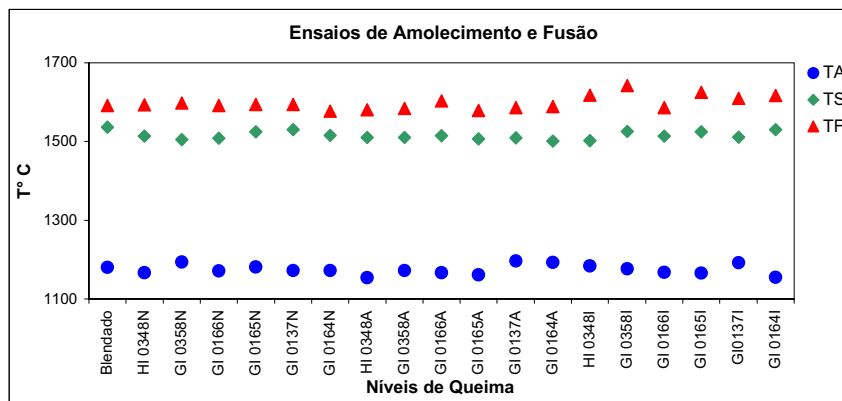


GRÁFICO 41 – Resultado do ensaio de amolecimento e fusão dos 19 níveis de queima realizados. Foi observada a temperatura de amolecimento (TA); temperatura de início da perda de carga do gás (TS) e temperatura correspondente ao final da fusão do metal (TF). (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

Assim, observa-se que os níveis de queima da subfração nucleante é bastante constante. A subfração que apresenta maior variação é a intermediária, bem como os maiores valores também. Na subfração aderente, os valores são constantes também com uma pequena variação do minério GI 0166. Esta variação

atribui-se à maior espessura da zona coesiva. Esse mesmo minério, entretanto, é o que apresenta menor valor na subfração intermediária.

O minério que apresenta a maior espessura da zona coesiva de todos os níveis de queima é o GI 0358 da subfração intermediária. A zona coesiva, em praticamente todos os níveis de queima, são maiores que o minério blendado.

VIII.6.4.3 – Vazão de ar e temperatura

A vazão de ar consiste no volume de ar que atravessa o leito de sinterização: quanto maior a vazão, mais permeável é o leito. A temperatura dos gases é obtida em uma caixa de vento pré-determinada. Na FIGURA 01 (ANEXO III), há gráficos da vazão de ar em relação ao tempo decorrido de sinterização e da temperatura dos gases em relação ao tempo decorrido. Ambos os tipos de gráficos podem ser correlacionados, pois são medidos simultaneamente.

A inflexão da curva nos gráficos de vazão de ar indica um aumento na permeabilidade do leito de sinterização, dado pelo final da formação da fase líquida e início da cristalização dos componentes do bolo de sinter. O aumento abrupto da vazão de ar ocorre quando o sinter é formado, aumentando assim a permeabilidade do leito.

A inflexão ascendente da curva da temperatura dos gases ocorre pelo início da passagem dos gases quentes, sendo culminado pela chegada da frente de combustão ao final da panela. A inflexão descendente é dada pelo início do processo de resfriamento.

Por meio da função de cada curva, pode-se concluir que os gráficos da vazão de ar e temperatura dos gases apresentam comportamentos contrários. Observa-se que a curva da vazão de ar aumenta abruptamente após a transformação da mistura no bolo de sinter, cuja porosidade aumenta abruptamente a permeabilidade do leito. É nesse momento que a temperatura dos gases começa a declinar, pois seu ponto máximo é quando a frente de combustão atinge o final da panela.

O minério blendado encontra-se em vermelho e é utilizado como referência em todos os gráficos. A observação deste minério mostra que apresenta um comportamento intermediário entre os minérios estudados.

VIII.6.4.3.1 – *Subfração Nucleante*

A vazão de ar na subfração nucleante apresenta três grupos distintos (FIGURA 01 – ANEXO III): (i) os minérios GI 0166 e HI 0348; (ii) os minérios blendado, GI 0137, GI 0164 e GI 0165; (iii) o minério GI 0358. O primeiro grupo, além de apresentar valores de vazões maiores desde o início do processo, o aumento abrupto da vazão de ar inicia antes dos demais minérios, indicando que o leito durante o processo era mais permeável e este tornou-se mais permeável num tempo menor que os demais, ou seja, o processo de sinterização foi mais rápido. O segundo grupo apresenta um comportamento intermediário entre os outros dois grupos. O terceiro mostra que o aumento abrupto da vazão de ar levou mais tempo para ocorrer.

Essa diferenciação no tempo gasto para completar o processo de sinterização deve-se à sua composição com maior quantidade de minerais hidratados e, talvez, devido à densidade de carga dos minérios. No primeiro grupo, tem-se as menores densidades de cargas antes do carregamento, apesar de o terceiro grupo ter densidade de carga e tempo menores que o grupo intermediário, a sua composição mais magnetítica pode ser responsável pela posterga no aumento da vazão de ar.

A temperatura dos gases dessa subfração também tem curvas que podem ser divididas em três grupos, no entanto não podem ser correlacionados com os grupos das curvas do gráfico da vazão de ar (FIGURA 01 – ANEXO III).

O primeiro grupo é formado pelo minério HI 0348, cuja curva inicia-se antes dos demais minérios, além de apresentar mais baixa, indicando que a temperatura máxima atingida foi menor que dos demais minérios. O segundo grupo é formado pelos minérios: blendado, GI 0358, GI 0166, GI 0164 e GI 0137. Estes minérios podem ser subdivididos em subgrupos: (i) pelos minérios GI 0166, GI 0137 que apresentam temperaturas máximas mais baixas; (ii) o segundo, formado pelo

minério GI 0164 que apresenta a maior temperatura deste grupo; e o minério blendado, que apresenta o início do ponto de resfriamento antes dos demais minérios; no entanto, ambos têm uma temperatura maior que o primeiro subgrupo; (iii) o terceiro grupo é formado pelo minério GI 0165, cuja curva se inicia depois de todos os minérios, além de apresentar a maior temperatura, sua curva de resfriamento é a que inicia mais tarde.

VIII.6.4.3.2 – *Subfração Intermediária*

Apesar dos minérios utilizados nesta subfração serem pouco representativos em termos de volume, no final do processo podem ser observadas variações significativas no comportamento desses minérios.

As curvas de vazão de ar desses minérios mostram três grupos distintos com relação à curvatura da curva (FIGURA 01 – ANEXO III). O primeiro grupo composto pelos minérios GI 0137, GI 0164, GI 0165, GI 0166 e HI 0348, apresenta uma curvatura mais fechada, indicando um aumento maior da vazão de ar com o tempo. O segundo grupo é composto pelo minério blendado, tem uma curvatura mais aberta de sua curva, indicando aumento menor de vazão de ar em relação ao tempo decorrido. O terceiro tipo é dado pelo minério GI 0358, que tem um ligeiro atraso no início de subida de sua curva, que inicia um pouco aberta e com o tempo apresenta melhora na sua vazão de ar em relação ao tempo.

A temperatura dos gases dessa subfração pode ser dividida em dois grupos distintos (FIGURA 01 – ANEXO III), visto que todos os minérios iniciam a curva praticamente ao mesmo tempo. O primeiro grupo é formado pelos minérios GI 0137, GI 0166, e GI 0358. Esses minérios apresentam uma temperatura máxima maior, sendo a maior deles a do minério GI 0358. O segundo grupo é formado pelos minérios blendado, HI 0348, GI 0164 e GI 0164, dentre esses minérios o que possui a menor temperatura máxima é o minério HI 0348. O início do resfriamento em todos os minérios é muito próximo, com exceção do minério blendado que inicia pouco depois.

VIII.6.4.3.3 – *Subfração Aderente*

O gráfico da vazão de ar dessa subfração também apresenta três grupos distintos (FIGURA 01 – ANEXO III). O primeiro é representado pelo minério HI 0348 e GI 0165; o segundo representado pelos minérios, blendado, GI 0137, GI 0164 e GI 0166; o terceiro, dado pelo minério GI 0358.

No primeiro grupo, o minério HI 034 mostra a inflexão da curva mais cedo, seguido do minério GI 0165, cuja curva apresenta um comportamento intermediário entre o primeiro e segundo tipo, indicando que sua curva é mais íngreme que o primeiro e no final acompanha o minério HI 0348. O segundo tipo é dado pelos minérios que apresentam o início da curva num tempo posterior ao do primeiro tipo e anterior ao do terceiro tipo, apresentando um crescimento mais suave de sua curva. O terceiro tipo é o que mais demorou para dar início ao crescimento da curva, além de apresentar a curvatura mais suave, indicando um aumento mais ameno para a vazão de ar pelo sinter, o que pode indicar que o sinter não seja muito poroso.

As curvas das temperaturas dos gases dos minérios estudados apresentam comportamentos variáveis (FIGURA 01 – ANEXO III), sem formar grupos, tanto no tempo de início de sinterização, na temperatura máxima quanto no início do resfriamento. O minério com menor tempo para o aumento da temperatura dos gases é o HI 0348 e o de maior tempo o GI 0164, os demais apresentam tempos intermediários a esses dois. Com relação a temperatura máxima obtida, tem-se que o minério HI 0348 com a menor temperatura máxima e com início do resfriamento anterior aos demais. A maior temperatura é dada pelos minérios GI 0164 e GI 0348, sendo que este último tem o seu início de resfriamento posterior ao do GI 0164.

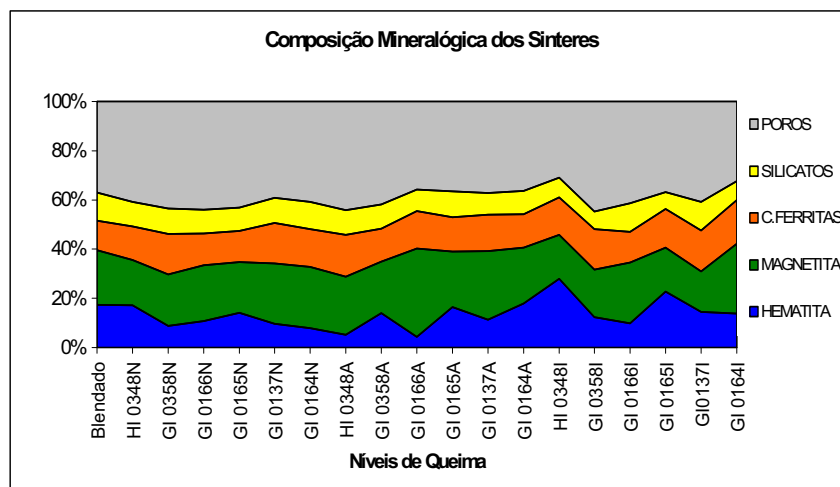
VIII.6.5 - CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E MICROESTRUTURAIS

Nesta etapa do estudo, os sínteres piloto foram submetidos a uma análise quantitativa de fases no Analisador Contínuo de Fases (Quantimet) no Laboratório de Análise Mineralógica e Microestrutural de Sínter e Minério de Ferro do Centro de P&D da Usiminas.

A descrição consta da distribuição mineralógica dos diferentes minerais presentes nos sínteres, hematita, Mg, ferritos de cálcio e silicatos de cálcio e da sua porosidade total (Pr abertos e fechados) (TABELA 01 a 04 no ANEXO III).

O GRÁFICO 42, que mostra a distribuição mineralógica dos sínteres obtidos dos 19 níveis de queima, é uma análise semiquantitativa. No entanto, é possível observar algumas diferenças na quantidade de determinadas fases.

O minério com menor quantidade de Pr é o HI 0348 da subfração intermediária, que apresenta também a maior quantidade de hematita. O minério que apresentou a maior quantidade de Mg e a menor quantidade de hematita é o minério GI 0166 da subfração aderente. Esses minerais apresentam uma relação inversa: a maior ou menor presença de cada tipo depende da quantidade de combustível adicionado na mistura, gerando um ambiente redutor ou oxidante, formando Mg ou hematita, respectivamente (OLIVEIRA & MEDEIROS, 1998).



GRPAFICO 42 – Resultado da caracterização mineralógica dos sínteres obtidos dos 19 níveis de queima realizados: (N) Nucleante, (A) Aderente, (I) Intermediária.

O minério GI 0164 é o que apresenta a maior quantidade de cálcio ferritos gerados, enquanto que o minério blendado é o que apresentou a sua menor quantidade. A maior presença de silicatos ocorre no minério GI 0166 na subfração intermediária e a menor ocorre no minério GI 0165 da mesma subfração. A maior ou menor ocorrência de cálcio-ferritos e silicatos, está associada à reação sólido-líquido em torno de 1200° C, por reação interativa entre o Fe_2O_3 e o líquido gerado pela mistura $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$.

IX – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo discorre sobre a interpretação e a discussão da caracterização geológica dos 6 (seis) minérios escolhidos e sua correlação com os resultados experimentais obtidos pelos 19 (dezenove) níveis de queima realizados.

Os minérios escolhidos mostram variações tanto na sua mineralogia quanto na sua textura e microestrutura interna, que refletem na forma das partículas primárias das diferentes subfrações, fazendo com que tenham características bastante distintas.

Assim, cada minério tem uma identidade estrutural diferenciada, refletindo na propriedade de sinter e no processo de sinterização. A TABELA 50 mostra como algumas características dos minérios podem afetar o processo de preparação e sinterização.

Os resultados dos níveis de queima executados mostraram gerações de diferentes tipos de sínteres, cujos testes de qualidade puderam demonstrar desempenho diferenciados.

Outro aspecto interessante dos resultados experimentais é o comportamento diferenciado dos tipos de minérios nas suas diferentes subfrações, conforme foi apresentado no capítulo anterior.

Pode-se dizer que os minérios apresentam comportamentos distintos em cada subfração estudada, com resultados diferenciados nos processos de preparação e sinterização. Observa-se que determinados minérios que não têm bons índices de sinterização e de qualidade numa subfração, pode apresentar bons índices na(s) outra(s) subfração (ões) (TABELA 51).

Parâmetro de Controle	Método de Análise	Propriedade do Sínter	Influência no Processo de Sinterização
Constituintes mineralógicos	Caracterização mineralógica das fases presentes por microscopia ótica. Para minerais de ganga por difratometria de raio X.	Microestrutura, porosidade, propriedades físicas e metalúrgicas	Aglomerabilidade, produtividade e consumo de energia
Tamanho dos cristais	Valor modal por microscopia ótica	Redutibilidade	Aglomerabilidade, produtividade e consumo de energia
Trama das partículas primárias	Avaliação por microscopia ótica	Propriedades físicas e metalúrgicas	Aglomerabilidade, produtividade e consumo de energia
Anisotropia cristalina das partículas primárias	Microscopia ótica	Propriedades físicas e metalúrgicas	
Forma das partículas primárias	Microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura	Propriedades físicas e metalúrgicas	Aglomerabilidade, produtividade e consumo de energia
Porosidade, distribuição, tamanho e forma dos Pr das partículas primárias	Microscopia ótica	Propriedades físicas e metalúrgicas	Aglomerabilidade, produtividade e consumo de energia
Relação entre fragmentos nucleantes e aderentes	Análise granulométrica	Propriedades físicas e metalúrgicas	Aglomerabilidade, produtividade e consumo de energia

TABELA 50 – Principais parâmetros recomendados para identificação do sinter feed e como afetam o produto sinter e o processo de sinterização (Modificado de VIEIRA et al., 1998; PIMENTA et al., 1999).

No presente trabalho, observou-se que não é possível escolher um único minério como o melhor de todos (TABELA 51). Como já enfatizado, alguns minérios apresentam excelentes índices para uma determinada qualidade; para outra ficam abaixo do esperado. E, também alguns minérios são bons como nucleantes e ruins como aderentes, enquanto outros mostram a relação inversa. Através desse conhecimento, pode-se escolher uma mistura em que se obtém um sinter mais produtivo e de melhor qualidade.

Minérios	Minerologia	Textura	TA °C	ΔT °C	Índice de Granulação	Processo de Sinterização	Testes de Qualidade do Sinter	
Blenda-			1180	412	Média	Prod média; menor FR de todos os níveis	ST média; Melhor TT de todos os níveis; RDI média; Re média.	
GI 0137	N	Hr,	Gr	1172	422	> média	Maior Prod da subfração; FR média.	Melhor ST da subfração; Melhor TT da subfração; melhor RDI de todos os níveis; Re média.
	I	Hr	Gr	1192	418	> média	Prod Média; FR média.	ST média; Melhor TT da subfração; RDI média; Melhor Re de todos os níveis.
	A	Hr	Gr	1197	389	> média	Prod Média; maior FR de todos os níveis.	ST média; Melhor TT da subfração; RDI média; Re média.
GI 0164	N	HI (Hr, Mg, Mt e Mh)	La	1172	405	<u>Melhor da subfração</u>	Prod Média; FR média	ST média; TT média; melhor RDI de todos os níveis; Re média.
	I	HI (Hr, Mg, Mt e Mh)	La	1155	462	> média	Prod Média; FR média	ST média; TT média; melhor RDI da subfração; um dos piores Re da subfração.
	A	HI (Hr, Mg, Mt e Mh)	La	1193	396	> média	2ª. Menor Prod de todos os níveis; FR média	ST média; TT média; RDI média; um dos piores Re da subfração.
GI 0165	N	Hr (HI, Mg, Mt e Mh)	Gr	1181	413	> média	Prod Média; FR média	ST média; TT média; pior RDI da Subfração; Pior Re da subfração.
	I	Hr (HI, Mg, Mt e Mh)	Gr	1166	459	Média	<u>Maior Prod da subfração; menor FR da subfração</u>	ST média; TT média; RDI média; Re média.
	A	Hr (HI, Mg, Mt e Mh)	Gr	1161	418	Média	Maior Prod de todos os níveis; FR média	ST média; TT média; RDI média; Re média.
GI 0166	N	Hr, Mt, HI, Mg, e Mh.	Gr a La	1171	421	< média	Prod Média; FR média	Pior ST da subfração; Pior TT da subfração; RDI média; Re média.
	I	Hr, Mt, HI, Mg, e Mh.	Gr a La	1168	418	<u>Melhor da subfração</u>	Prod Média; menor FR de todos os níveis.	ST média; TT média; RDI média; Re média.
	A	Hr, Mt, HI, Mg, e Mh.	Gr a La	1167	436	Melhor de todos os níveis.	Prod Média; FR média a baixo	Pior ST de todos os níveis; TT média; melhor RDI da subfração; Re média.
GI 0358	N	Hr, Mt, Mg, Mh e HI	Gr	1194	404	<i>Pior da Subfração</i>	<i>Menor Prod da subfração; menor FR da subfração</i>	ST média; TT média; RDI média; Re média.
	I	Hr, Mt, Mg, Mh e HI	Grr	1177	465	< média	<i>Menor Prod da subfração; FR média</i>	Melhor ST da subfração; Pior TT de todos os níveis; Pior RDI da Subfração; Re média.
	A	Hr, Mt, Mg, Mh e HI	Gr	1172	412	< média	Menor Prod de todos os níveis; FR média	Melhor ST de todos os níveis; TT média RDI média; Melhor Re da subfração.
HI 0348	N	Hm, Hr, HI e Mh	MG r	1167	426	< média	Prod Média; maior FR da subfração	ST média; Pior TT da subfração; RDI média; Melhor Re da subfração.
	I	Hm, Hr, HI e Mh	MG r	1184	434	<i>Pior da subfração</i>	<i>Menor Prod de todos os níveis; FR maior da subfração</i>	<i>Pior ST da subfração</i> ; TT média; RDI média; Re média.
	A	Hm, Hr, HI e Mh	MG r	1154	427	<i>Pior da subfração</i>	2ª maior Prod de todos os níveis; FR média a alto	ST média; TT média; Pior RDI e Re de todos os níveis.

TABELA 51 – Tabela com os principais resultados obtidos no presente estudo. TA – Temperatura de Amolecimento; ΔT – Diferença entre a temperatura de amolecimento e de fusão; Prod. – Produtividade; FR – Finos de Retorno; ST – *Shatter Test*; TT – *Tumbler Test*; Re – Redutibilidade, Gr – Granular; La – Lamelar, MGr - Microgranular. () Minerais encontrados em menor proporção. As letras: em vermelho são os piores, em azul são os melhores resultados de todos os testes realizados; em itálico os piores da subfração e sublinhado os melhores da subfração.

Na TABELA 51, apresenta-se o resumo geral do comportamento e rendimento dos diferentes níveis de queima nos processos em que foram estudados. Através dessa tabela, pode ser observado o comportamento diferenciado das diferentes subfrações de um mesmo minério.

Isso indica que um tipo de minério pode ter boas qualidades numa determinada subfração em alguns índices, enquanto a outra subfração desse mesmo minério, em outros índices. Como pode ser visto, cada subfração utilizada na mistura a sinterizar pode ser escolhida de forma a otimizar o rendimento do processo.

Portanto, através do presente estudo, pode-se observar quais as características do minério que otimizam determinadas propriedades do sinter e do processo de sinterização. Acredita-se que, com os dados gerados pelo presente trabalho, pode-se extrair algumas informações interessantes para a definição de misturas ótimas para o processo de sinterização, gerando sínteres melhores para uso em altos-fornos.

Assim, serão ressaltadas algumas características observadas de cada minério e sua correlação com o processo de sinterização, bem como a comparação com aquelas encontradas na literatura.

IX.1 – Características dos Minérios de Ferro

Os minérios estudados, nas suas diferentes subfrações, apresentam composição mineralógica semelhantes e forma das partículas primárias e distribuição e tamanho dos Pr diferenciadas. As características externas das subfrações nucleantes são reflexos da mineralogia, o arranjo interno e forma dos cristais e Pr presentes; enquanto que nas subfrações aderentes, alguns minérios apresentam a forma do cristal como forma da sua partícula primária (GI 0164 e GI 0165).

IX.1.1 – CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E QUÍMICAS

A mineralogia dos minérios apresenta algumas variações, sendo principalmente no grau de recristalização da hematita. Este mineral encontra-se presente em todos os minérios como mineral predominante, sob diferentes formas e tamanhos.

A variação na ocorrência da hematita deve-se ao ambiente de formação do minério e principalmente ao grau de deformação sofrido pelo minério. O aumento da cristalinidade da hematita está associado ao aumento do grau de deformação sofrida pelo minério. Cristais bem cristalizados e grandes, com maior grau de cristalinidade, estão presentes nos minérios mais deformados.

Nos minérios estudados, a hematita é encontrada na forma de Mt, microcristalina, cristais pequenos granulares e cristais grandes granulares e lamelares. Apesar da predominância de determinados tipos de hematita nos minérios, esses não influem na tipologia do minério, pois a classificação dos minérios é feita pelo mineral predominante. Portanto, todos os minérios estudados são hematíticos com subclassificações diferenciadas.

Dos seis minérios estudados, três tipos de minérios são compostos basicamente de hematita com outro mineral subordinado em quantidades desprezíveis. No entanto, as hematitas apresentam diferentes graus de cristalizações. Os minérios são: GI 0137 (hematítico granular) – com o mais baixo grau de cristalização, observado pelos cristais de Hr de contatos interdigitados e irregulares; GI 0164 (hematítico lamelar a granular) – o mais alto grau de cristalização, cujos cristais de hematita são maiores e apresentam faces cristalinas bem definidas, com formação de pontos tríplices (cristal mais estável), e o alongamento e orientação dos cristais de hematita, indicam terem sofrido maior deformação durante a sua formação; GI 0165 (hematítico granular) – formados por

cristais de hematitas granulares grandes e bem formados, com cristais lamelares subordinados, esses não apresentam orientação definida.

É sabido que a presença de minerais hidratados, em quantidades adequadas, aceleram o processo de microaglomeração (CARNEIRO et al., 1984, GOLDRING & FRAY, 1989; CAPOLARI et al., 1998; entre outros). Os minérios hematíticos apresentam baixo grau de hidratação, onde os minerais hidratados, quando presentes, estão associados às proximidades de Pr ou nas pequenas fraturas, de ocorrência muito restrita, o que pode ser visto também pelo baixo PPC apresentado pelos minérios acima.

Os outros três minérios, apesar de conterem a hematita como mineral predominante, apresentam também Mh e Mg, de forma subordinada e em diferentes proporções.

As formas de ocorrência desses minerais subordinados são: HI 0348 – neste minério ocorre apenas o Mh disseminado de forma heterogênea, dentro da matriz microcristalina; GI 0358 – apresenta tanto a Mg quanto o Mh, em que o primeiro mineral é o gerador Mt, através do processo de martitização, e posteriormente da Hr; o segundo, é o produto de hidratação da Mg gerando o Mh; o minério GI 0166 – apresenta tanto a Mg quanto o Mh, esse minério tem vários tipos de hematitas e minerais hidratados de gerações diferentes: as hematitas podem ser primárias, Mt e HI (que são secundárias geradas a partir das hematitas primárias); os minerais hidratados são encontrados de diversas formas, como produto da hematita, Mg e/ou silicatos ferrosos (anfíbolios, principalmente).

A participação do Mh é heterogênea nesses minérios estudados, pode estar presente em partículas primárias altamente hidratadas e partículas primárias anidras, dentro do mesmo minério, principalmente nos minérios HI 0348 e GI 0358. No minério GI 0166, o Mh encontra-se presente, praticamente, em todas as partículas primárias, que apresentam um maior ou menor grau de hidratação; essa homogeneidade no grau de hidratação reflete no seu alto PPC.

O minério GI 0358, apesar de ter Mh, o seu teor de PPC é um dos mais baixos, enquanto que os minérios HI 0348 e GI 0166 apresentam os dois maiores valores de PPC dos minérios estudados.

A diferença no comportamento do teor de PPC desses minérios com minerais hidratados presentes, deve-se provavelmente à forma de ocorrência do Mh dentro dos minerais. No minério GI 0358, a sua ocorrência é heterogênea e em

menor escala que os demais minérios. No minério HI 0348, encontra-se disseminado na matriz microcristalina de hematita, mas sua distribuição é heterogênea. O que não ocorre no caso do minério GI 0166, que apresenta uma distribuição heterogênea e indica que parte do Mh é produto da Mg e parte estaria associado à rocha original geradora do minério.

As análises químicas dos diferentes tipos de minérios demonstram que, de um modo geral, nas subfrações aderentes há um aumento na quantidade dos compostos deletérios, SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 e do PPC, em relação às subfrações nucleantes. No entanto, para o teor de Fe(t), ocorre a situação inversa. O FeO apresenta um comportamento intermediário, ou seja, dependendo do minério, apresenta maior quantidade nas subfrações nucleantes que nas aderentes, como GI 0164, GI 0165, GI 0166 e GI 0358; no minério HI 0348 apresenta a situação inversa; no minério GI 0137 apresenta variações dentro de ambas subfrações.

A presença de impurezas dentro do minério mostra que há uma correlação inversa com o teor de Fe(t), visto que os minérios que apresentam menores teores de Fe(t) são os que têm maiores quantidades de outros compostos.

O teor de Fe(t) dos minérios hematíticos é alto e bastante próximo. Os minérios que apresentam teores menores, como o caso dos minérios GI 0166 (menor de todos) e HI 0348, são os que, além de apresentarem maiores quantidades de minerais hidratados apresentam também outros compostos, como no caso do GI 0166 que possui alto P_2O_5 , SiO_2 , Al_2O_3 e PPC, enquanto o HI 0348 tem alto Al_2O_3 e PPC. Estudos demonstram que as impurezas dos minérios geralmente estão associadas aos minerais hidratados (GOLDRING & FRAY, 1989; PIMENTA et al., 1999; SANTOS & BRANDÃO, 2003).

A presença do SiO_2 no minério é positiva quando se encontra nas subfrações mais finas, pois assim participa das reações de sinterização, favorecendo a formação de compostos mineralógicos de maior resistência mecânica, elevando as características mecânicas e granulométricas do sínter (BENTES *et al.*, 1994; PIMENTA et al., 1999). Nas subfrações mais grossas, elas não participam das reações de sinterização, diminuindo o volume real da escória fragilizando o sínter (PIMENTA et al., 1999).

Os minérios que apresentam teores elevados de Al_2O_3 mostram a distribuição em todas as suas faixas granulométricas. A presença desse composto

nas subfrações nucleantes não é problemática, visto que essas subfrações não participam das reações de sinterizações. No entanto, a presença de Al_2O_3 nas subfrações mais finas exerce uma forte influência negativa no índice de degradação sob redução (RDI), pois participa das reações de sinterizações, dissolvendo-se na rede da hematita secundária, tensionando a sua estrutura, tornando o sinter mais frágil (PIMENTA *et. al.*, 1999).

O TiO_2 apresenta o mesmo comportamento que o Al_2O_3 , com a diferença de que, geralmente, a sua quantidade é muito pequena e heterogênea, visto que as quantidades nas subfrações aderentes são maiores que nas subfrações nucleantes.

O teor de fósforo apresenta uma forte restrição, visto que a sua eliminação pela escória do alto-forno é de apenas 10%, limitando a produção de aços mais nobres (PIMENTA *et. al.*, 1999). Esse elemento encontra-se disseminado nas goethitas, o que as transforma na maior fonte de contaminação dos concentrados (COELHO *et al.*, 1999; SILVA, 1999)

O minério GI 0166, além de apresentar maior variação mineralógica, também tem maior variação química, como pode ser visto tanto pelos gráficos de composição de minerais, quanto pelos gráficos químicos apresentados no capítulo VIII. Portanto, era de se esperar que esse minério apresentasse comportamentos bem diferenciados tanto na preparação quanto na sinterização. Nos ensaios de sinterabilidade, esse minério apresenta baixa resistência a frio, principalmente à queda tanto para as subfrações nucleantes quanto para as aderentes; as subfrações intermediárias apresentam comportamento semelhante aos outros minérios.

IX.1.2 – CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DAS PARTÍCULAS PRIMÁRIAS DE MINÉRIOS

Nesse trabalho, foi feito estudo das características externas das partículas primárias nos diferentes tipos de minérios, em que se buscou correlacionar as características de rugosidade das superfícies, variação na distribuição das formas e tamanhos das partículas primárias, com as suas características internas, tipo, mineralogia, tamanho e arranjo dos cristais.

Os tipos de hematitas influenciam nos arranjos dos minerais e Pr, que apresentam diferentes estruturas internas nas partículas primárias, gerando microestruturas diferenciadas para cada minério e, conseqüentemente, na textura dos minérios. Assim, conclui-se que os diferentes minérios, apesar de serem hematíticos, com suas diferentes formas de ocorrência da hematita, apresentam características internas diferenciadas, como tamanho, forma e arranjo dos cristais, que por sua vez, podem influenciar nas características externas das partículas primárias, como a superfície externa e a forma dos diferentes tipos de minérios.

As superfícies das partículas primárias das subfrações nucleantes nem sempre são correlacionáveis com a sua mineralogia e textura. As subfrações nucleantes, observadas pelas imagens de MEV (FIGURA 57), demonstram que os minérios com granulometria dos cristais mais finos, apresentam uma superfície formada por pequenas rugosidades, com bastante quantidade de finos aderidos na sua superfície, como pode ser visto pelos minérios GI 0137 e GI 0166, HI 0348 e GI 0358. Apesar de superfícies externas semelhantes, estes minérios apresentam mineralogias diferenciadas (FIGURA 57). Os minérios GI 0164 e GI 0165 têm superfícies externas mais lisas, na forma de degraus e com menor quantidade de finos aderidos na sua superfície.

As subfrações aderentes dos minérios estudados têm distribuição de tamanhos diferenciados, apesar de pertencerem à mesma faixa granulométrica, com diferenças na rugosidade de suas superfícies externas (FIGURA 62). O minério HI 0348 apresenta pouca rugosidade, com uma distribuição mais homogênea nos tamanhos das partículas primárias. Isso ocorre devido à sua composição dominante ser de hematita microcristalina, com superfícies menos rugosas e pelo arranjo desses cristais, que não favorece a desagregação do minério em partículas primárias menores. Os minérios GI 0166 e GI 0358 apresentam a mesma distribuição de tamanhos das partículas primárias com dois tamanhos, predominando um mais grosseiro e outro muito fino. O grau de rugosidade de ambos minérios é intermediário entre o HI 0348 e GI 0137. O minério GI 0137, além de ser o mais rugoso desses minérios, é o que apresenta a maior

variação na distribuição dos tamanhos das partículas primárias. Os minérios GI 0164 e GI 0165 são os que possuem superfícies externas menos rugosas e menor distribuição dos tamanhos das partículas primárias.

A rugosidade na superfície das partículas primárias está mais associada ao tamanho dos cristais de minerais e sua homogeneidade, que na variação da composição mineralógica; enquanto que a variação da distribuição do tamanho das partículas primárias está associada ao arranjo dos cristais e também à variação nos tamanhos dos cristais de minerais dentro das partículas primárias.

A presença de finos aderidos na superfície das partículas primárias de minérios pode prejudicar o comportamento de nucleação durante o processo de microaglomeração, visto que os minérios que têm superfície rugosa, também possuem bastante finos aderidos na sua superfície. Além de aumentar a quantidade de finos da mistura, podem reduzir a capacidade de aglomeração dessas partículas nucleantes.

As formas das partículas primárias mais grossas das subfrações nucleantes, recebem tanto influência externa, da foliação e/ou xistosidade da rocha, quanto influência interna, das texturas apresentadas pelos minérios. O minério GI 0166 é um exemplo desse fato, visto que as partículas primárias das faixas granulométricas mais grossas apresentam-se alongadas, refletindo o bandamento original do minério. À medida que decresce o tamanho das partículas primárias das faixas granulométricas mais finas desse minério, as formas tornam-se menos alongadas.

A forma das partículas primárias das subfrações nucleantes da maioria dos minérios estudados são subalongados: GI 0137, GI 0165 e HI 0348. Os minérios GI 0164 e GI 0166 são alongados: (i) o primeiro tem essa forma, provavelmente, devido ao arranjo orientado dos cristais lamelares de hematita; (ii) o segundo deve a sua forma ao bandamento original do minério. O minério GI 0358 apresenta forma subgranular. Através das formas das partículas primárias, pode-se obter o grau de alongação das partículas primárias de minérios.

Os minérios GI 0137, HI 0348, GI 0358 e GI 0166, das subfrações aderentes, apresentam as formas das partículas primárias menos alongadas que nas subfrações nucleantes, esse fato deve-se a maior contribuição dos cristais de minerais isolados, que têm formas granulares.

Os minérios GI 0164 e GI 0165, no entanto, apresentam-se mais alongados que nas subfrações nucleantes; isso deve-se ao fato de as partículas primárias, ao se tornarem menores, se assemelharem mais aos cristais de hematita, principalmente para o minério GI 0164.

O minério GI 0165, apesar de ter cristais de hematitas granulares, tem partículas primárias alongadas devido à sua forma de fracionamento em faixas granulométricas menores, que deve estar associado à lineação mineral incipiente, dado pelo arranjo interno dos cristais.

Assim, assenta-se que, a forma das partículas primárias nas subfrações aderentes pode estar associada tanto com a forma quanto com o seu arranjo dos cristais de minerais.

A caracterização geológica de um novo minério de ferro, a ser utilizado no processo de sinterização, deve ser feita para facilitar o entendimento de alguns fatores que contribuem favorável ou desfavoravelmente no processo.

O conhecimento das características internas do minério, tipo de mineralogia, porosidade, arranjo dos cristais, textura e microestrutura. Esse conhecimento pode ser correlacionado com os tipos de partículas primárias geradas por cada minério, dando informações sobre: os tipos de rugosidade de suas superfícies, formas das partículas primárias e grau de alongação.

No processo de sinterização, o estudo das características externas das partículas primárias é priorizado, pois influenciam diretamente no processo de microaglomeração e, conseqüentemente, no processo de sinterização; no entanto essas características nada mais são do que reflexos de suas características internas.

A vantagem do conhecimento geológico do minério não se restringe ao conhecimento do comportamento do minério nas etapas dos processos de preparação, microaglomeração, sinterização e no seu desempenho, mas também no entendimento de como cada característica afeta de forma positiva ou negativa em determinados pontos desses processos. Pois além de buscar o melhor tipo de minério para o processo de sinterização, tem-se o conhecimento de suas causas e efeitos durante as etapas desse processo.

IX.2 - Índice de Granulação

A utilização de um método de nucleação do minério antes do processo de sinterização surgiu da necessidade de incrementar a permeabilidade do leito, aumentando, em consequência, a qualidade e produtividade do sinter obtido.

O minério, no seu estado natural, além de apresentar uma granulação mais fina, apresenta uma grande dispersão no tamanho das partículas primárias, não permitindo uma boa permeabilidade do leito de sinterização. O processo de nucleação de um minério tem como objetivo principal diminuir a dispersão no tamanho das partículas primárias e aumentar o tamanho das partículas primárias, cujo desempenho é medido pelo índice de granulação.

O índice de granulação de um minério é dado pelo crescimento no tamanho das partículas primárias do minério, que mostra ser eficiente na aglomeração das subfrações intermediárias e aderentes.

A obtenção do melhor índice de granulação está associada ao próprio minério em si, além de outros fatores: a determinação da umidade ótima para cada mistura; o tempo de residência da mistura no misturador; a resistência das micropelotas.

O grau de crescimento das micropelotas é determinado, principalmente, pela umidade da mistura e pela disponibilidade de partículas finas presentes da mistura (ABOUZEID & SEDDIK, 1981; LITSTER & WATERS, 1990; BENTES et al., 1994; HINKLEY et al., 1994; VENKATARAMANA et al., 1999). No entanto, não há uma relação clara entre o tamanho da partícula nucleante e a largura da camada aderida (VENKATARAMANA, et al., 1999).

A umidade ideal depende do tipo de minério a ser sinterizado. A utilização de uma umidade menor, além de gerar micropelotas menores, pode fazer com que sobre grande quantidade de partículas finas, diminuindo a permeabilidade do leito de sinterização; enquanto que, o aumento excessivo de umidade pode formar micropelotas maiores que as torna plásticas, ou seja, mais deformáveis, diminuindo também, a permeabilidade do leito de sinterização (HINKLEY et al., 1994).

LITSTER & WATERS (1990) sugerem que o crescimento da micropelota ocorra em dois estágios, o primeiro: as partículas mais finas aderem rapidamente nas superfícies das partículas intermediárias e nucleantes, e o segundo, com a continuação do tamboramento, as partículas intermediárias passam a ser incorporadas nas camadas ao redor das partículas nucleantes, formando micropelotas maiores.

Outro ponto abordado pelos autores LITSTER & WATERS (1990) é com relação ao tempo de residência da mistura no tambor. Nos primeiros cinco minutos, as micropelotas crescem rapidamente, mas continuam crescendo para tempos maiores que trinta minutos de tamboramento, gerando micropelotas 45% maiores que as micropelotas geradas aos cinco minutos. O tempo de residência da mistura no tambor é inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro do tambor (LITSTER & WATERS, 1990).

A proporção ideal de cada subfrações nucleantes, intermediárias e aderentes na mistura deve ser em quantidades que propiciem a obtenção de micropelotas com as características desejadas acima. A proporção ideal de cada subfração varia para cada tipo de minério, onde devem ser observadas suas características químicas e físicas, ponderando as características positivas e negativas de cada subfração na definição da mistura durante o processo de microaglomeração.

As partículas intermediárias podem participar do processo de granulação tanto como partículas nucleantes quanto como partículas aderentes; esse comportamento variado vai depender das propriedades do minério e das condições de granulação (LITSTER & WATERS, 1990; HINKLEY et al., 1994).

A subfração nucleante deve ser composta de minério resistente a processos mecânicos, visto que será apenas calcinado ou praticamente não participará das reações de sinterização, pois atualmente tem-se buscado a

produção de sínter heterogêneo. Portanto, o entendimento de resistente, nesse caso, vem a ser o minério que também apresente maior resistência ao manuseio.

As subfrações mais finas dos minérios são responsáveis pelo crescimento das micropelotas, visto que aderem na superfície das partículas mais grossas (ABOUZEID & SEDDIK, 1981; LITSTER & WATERS, 1990; BENTES et al., 1994; HINKLEY et al., 1994; VENKATARAMANA et al., 1999; entre outros). A maior presença de sílica nessas subfrações mais finas, aumenta a resistência do sínter gerado, pois auxilia na formação da fase líquida, formando os silicatos ferritos durante o processo de sinterização (BENTES et al., 1994; MOURÃO, et al., 1996; PIMENTA et al., 1999). Tal fato permite, o aumento dessa subfração na mistura de minérios a ser sinterizada (BENTES et al., 1994).

Assim, deduz-se que, um minério sob determinada umidade e tempo de misturamento, para ser considerado de boa qualidade, deve obter um bom índice de granulação, ou seja, apresentar crescimento dos grânulos, maior consumo possível de partículas intermediárias e aderentes e ser resistentes ao manuseio antes da queima. Pois essas qualidades influenciam diretamente na permeabilidade do leito de sinterização e, conseqüentemente, na produtividade e qualidade do sínter gerado.

A maior produtividade do processo é obtida quando se utiliza umidade menor que a necessária para obter a máxima permeabilidade do leito de sinterização (DAWSON, 1993b; HINKLEY et al., 1994). A umidade para geração de micropelotas maiores, que teria a permeabilidade máxima do leito, não deve ser utilizada, pois formaria micropelotas mais deformáveis, plásticas, provocando a diminuição dos espaços vazios entre as micropelotas e, conseqüentemente, a permeabilidade do leito (HINKLEY et al., 1994).

Nos minérios estudados, utilizou-se umidade de 6% para quase todos os níveis de queima, com exceção do minério GI 0166 que foi de 7%. Essa umidade maior desse minério deve-se, provavelmente, à porosidade do minério, cuja água adicionada preenche os Pr também, ou seja, é absorvida pelo minério (ABOUZEID & SEDDIK, 1981; MOURÃO et al., 1996), fazendo com que necessite de mais água para melhorar o processo de nucleação.

O minério GI 0166, além de apresentar necessidade de maior umidade, necessita também de maior quantidade de coque. Isso ocorre devido a sua característica mineralógica, que apresenta grande quantidade de minerais

hidratados e pela sua porosidade, tornando o seu produto sinter frágil. Essa maior adição de coque é para auxiliar na produção da mesma quantidade de finos de retorno que os demais minérios, ou seja, torna o sinter mais resistente. Pois, foi o que apresentou a maior taxa de finos de retorno, com a mesma quantidade de coque que os demais minérios.

A determinação do índice de granulação (G_i) foi feita, utilizando as relações definidas abaixo (adaptação de VIDAL et al., 1985), onde se tem para cada tamanho de micropelotas, a eficiência de eliminação das subfrações mais finas durante o processo de granulação. As expressões abaixo demonstram o cálculo do índice de granulação para cada faixa de tamanho de partículas primárias restantes dentro da mistura.

$$G_i (1) = [(A1 + A2)/A1] \times 100$$

A1 – Partículas Primárias, quantidade de partículas < 0,25 antes da granulação.

A2 – Quantidade de partículas < 0,25 DEPOIS da granulação.

$$G_i (2) = \{[(A1 + B1) - (A2 + B2)] / (A1 + B1)\} \times 100$$

B1 - Partículas Primárias, quantidade de partículas <0,25 + 0,25 antes da granulação.

B2 - Quantidade de partículas < 0,25 + 0,25 DEPOIS da granulação.

$$G_i (3) = \{[(A1 + B1 + C1) - (A2 + B2 + C2)] / (A1 + B1 + C1)\} \times 100$$

C1 - Partículas Primárias, quantidade de partículas <0,25 + 0,25 + 0,50 antes da granulação.

C2 – Quantidade de partículas <0,25 + 0,25 + 0,50 DEPOIS da granulação.

$$G_i (4) = [(M4 - P4) / M4] \times 100$$

$$G_i (5) = [(M5 - P5) / M5] \times 100$$

$$G_i (6) = [(M6 - P6) / M6] \times 100$$

P4-P6 = PARTÍCULAS PRIMÁRIAS (1,00; 2,83 e 4,76 sucessivamente)

M4-M6 = MICROPELOTAS (1,00; 2,83 e 4,76 sucessivamente)

Deduz-se que, durante o processo de granulação, as subfrações abaixo de 0,5 mm foram classificadas como partículas aderentes e as subfrações maiores que 0,5 mm como partículas nucleantes. Com isso, observa-se que, o

índice considerado ideal para as subfrações aderentes deve-se aproximar de 100, enquanto que para as subfrações nucleantes, quanto maior o seu valor, indica que houve um aumento no seu tamanho em relação à mistura inicial, antes do processo de aglomeração.

Através das correlações acima, pode-se construir os GRÁFICOS 43, 44 e 45, com os índices de crescimento das micropelotas e o índice de granulação dos diferentes tipos de minérios estudados, nas suas respectivas subfrações: nucleantes, intermediárias e aderentes.

IX.2.1 – SUBFRAÇÃO NUCLEANTE

Os gráficos dos índices de crescimento e de granulação dos níveis de queima das subfrações nucleantes mostram um comportamento bastante interessante (GRÁFICO 43). Os minérios hematíticos têm maior índice de crescimento das micropelotas de 4,76 mm e maior índice de nucleação das partículas primárias mais finas, enquanto os demais minérios apresentam uma menor eficiência nesses índices, que serão discutidos abaixo.

O melhor comportamento do minério GI 0164 é do Gi (6) e do Gi (5). Provavelmente, deve-se à forma das suas partículas primárias, que apesar de apresentarem superfícies pouco rugosas, essas são angulosas permitindo a deposição de partículas mais finas nas concavidades presentes, criando uma camada de superfície inicial que propicia a deposição de outras camadas subsequentes.

O minério HI 0348 tem rendimento baixo nas frações Gi (6) e Gi (5). Isso ocorre, devido à granulação dos minerais que compõe este minério ser muito fina, pois apesar de formarem superfícies rugosas, estas são de pouca profundidade, dificultando a deposição das partículas primárias mais finas nessa

superfície e, conseqüentemente a formação da camada superficial. Além disso, as partículas primárias grosseiras desse minério são recobertas por minério de granulação mais fina, o que pode também, dificultar a deposição de novo material.

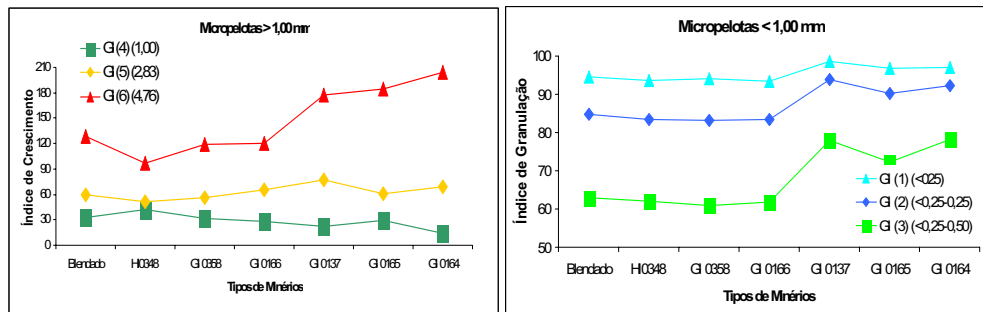


GRÁFICO 43 – Gráficos com os Índices de Crescimento das micropelotas > 1,00 mm (direita) e o Índice de granulação das micropelotas < 1,00 mm (esquerda) dos diferentes tipos de minérios na subfração nucleante.

Os demais minérios e o blendado têm comportamentos intermediários aos valores obtidos pelos minérios GI 0164 e HI 0348, tanto no Gi (6) quanto no Gi (5). No Gi (6), os minérios hematíticos demonstram que são bem mais eficientes no processo de crescimento das micropelotas de 4,76 mm que os demais minérios. Com relação ao Gi (5), essa evidência já não é tão clara, pois o minério GI 0165 apresenta a mesma taxa que o minério GI 0166; no entanto, os minérios GI 0137 e GI 0164 são maiores.

O índice de crescimento das micropelotas de 1,00 mm, Gi (4), apresenta comportamento oposto ao do Gi (5) (GRÁFICO 43). Esse comportamento diferenciado deve-se ao tamanho das partículas primárias de 1,00 mm comportarem-se tanto como partículas nucleantes como partículas aderentes. O aumento nas micropelotas de 1,00 mm associa-se à presença das partículas primárias menores, que provavelmente se nuclearam e formaram micropelotas desse tamanho.

Os índices de granulação das partículas mais finas apresentam dois patamares: o primeiro, com maior índice de granulação das partículas primárias de 0,50 mm, 0,25 mm e 0,25 mm, é formado por minérios hematíticos; o segundo, com menor índice de granulação, é formado por minérios mais hidratados e pelo minério blendado.

O índice de granulação das partículas primárias < 0,25 mm Gi (1) dos minérios hematíticos mostra que apenas uma pequena fração dessas partículas permaneceu sem participar do processo de microaglomeração. Para os minérios mais hidratados, esse índice Gi (1) é ligeiramente menor que o dos minérios hematíticos, indicando também um bom índice de granulação.

À medida que são incluídas de partículas mais grossas, observa-se que há um aumento na diferenciação do comportamento dos índices de granulação dos minérios hematíticos e hidratados. Essa observação indica que, os minérios hidratados não nucleiam as partículas primárias aderentes maiores tão bem quanto os minérios hematíticos, conforme pode ser observado pontos quadrados do gráfico da direita do GRÁFICO 43, cuja diferença é bastante acentuada em relação aos pontos triangulares.

O comportamento de nucleação das partículas primárias mais finas dos minérios GI 0137 e GI 0164 são bem próximos. Apesar da granulação dos minerais serem diferentes, esses minérios apresentam grau de porosidade bastante semelhante, o que pode ter levado a esse comportamento.

IX.2.2 – SUBFRAÇÃO INTERMEDIÁRIA

O estudo dos índices de crescimento das micropelotas das subfrações intermediárias (GRÁFICO 44), demonstra uma grande variação no comportamento dos diferentes minérios nas micropelotas de 4,76 mm sem, no entanto, observar-se uma correlação mineralógica, como nas subfrações nucleantes. Apesar da pequena participação da subfração intermediária na composição da mistura de minério, as variações observadas nos índices de crescimento e de granulação, indicam que estas partículas podem influenciar no processo, principalmente de forma negativa.

O índice de crescimento das micropelotas de 4,76 mm – Gi (6), dos minérios estudados, apresenta variações para os diferentes tipos de minérios. O minério de maior índice é o GI 0166 e o de menor índice o minério GI 0137. O maior crescimento das micropelotas de 4,76 mm do minério GI 0166 deve-se, provavelmente, ao grau de porosidade e quantidade de minerais hidratados das partículas intermediárias.

Os dois minérios com maior índice Gi (6) são os que apresentam uma contribuição maior das partículas primárias de 1,00 mm, na geração das micropelotas de 4,76mm, que pode ser o fator determinante. A sua presença pode ter propiciado a maior taxa de adesão das partículas primárias <0,25 mm, como a apresentada pelo minério GI 0166.

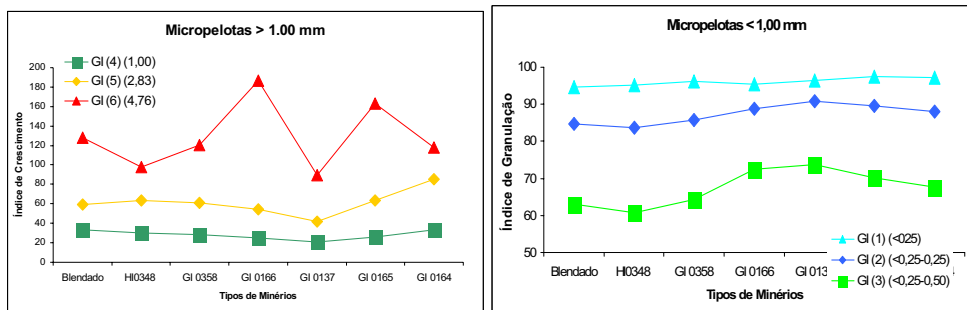


GRÁFICO 44 – Gráficos com os Índices de Crescimento das micropelotas > 1,00 mm (direita) e o Índice de granulação das micropelotas < 1,00 mm (esquerda) dos diferentes tipos de minérios na subfração intermediária.

O minério GI 0137 apresenta a pior taxa de crescimento, provavelmente, porque as partículas intermediárias desse minério não sejam boas partículas aderentes e nem nucleantes, para a formação de partículas maiores.

O índice de crescimento das micropelotas de 2,83 mm – Gi (5), mostra que o minério com maior crescimento foi o GI 0164, enquanto que o menor foi, novamente, o minério GI 0137. Isso demonstra que as partículas primárias intermediárias de 1,00 mm do minério GI 0164 apresentam-se ou como boa partícula nucleante, ou aderente na geração das micropelotas de 2,83 mm. O mesmo não ocorre com essas partículas do minério GI 0137, daí o seu pior comportamento.

O índice de crescimento das micropelotas de 1,00 mm – Gi (4) mostra que todos minérios apresentam quantidades muito próximas na geração de

micropelotas desse tamanho (GRÁFICO 44). O melhor índice é do minério GI 0164 e o pior do minério GI 0137, demonstrando que as partículas mais finas, de 0,50 mm (partícula intermediária) desses minérios, têm o mesmo comportamento das partículas de 1,00 mm no Gi (5).

Os minérios GI 0164 e GI 0165 apresentam, respectivamente, o segundo e o primeiro, melhores consumos das partículas primárias <0,25 mm, enquanto que o crescimento das micropelotas de Gi (4) e Gi (5) mostra uma correlação inversa, com GI 0164 em primeiro, o GI 0165 em segundo. Esse contraste demonstra que as subfrações intermediárias desses minérios participam do crescimento das micropelotas maiores, sem haver, necessariamente, relação com o consumo das partículas mais finas.

É interessante notar o comportamento do minério GI 0137, nos índices nas subfrações nucleantes e nas subfrações aderentes, que apresentam comportamentos opostos, Esse minério é bom nucleante das partículas mais finas, visto que essas partículas mais finas foram mais consumidas nesse minério que nos demais minérios. Isso indica que as partículas intermediárias desse minério, apesar de ser mais eficiente no consumo das partículas mais finas, esse consumo não propiciou o aumento efetivo na geração das micropelotas maiores.

O minério que teve o menor consumo das partículas <0,25 mm foi o blendado, mas não tão ruins nas partículas 0,25 mm e 0,50 mm. O minério de pior resultado nessas duas partículas foi o HI 0348. Isso indica que o minério blendado, apesar de ter menor consumo das partículas <0,25 mm, teve um consumo mais efetivo das partículas 0,25 mm e 0,50 mm, ou seja, essas tiveram uma melhor participação no processo de nucleação. Apesar de o minério HI 0348 apresentar um consumo um pouco melhor das partículas <0,25 mm, este minério não conseguiu que as partículas 0,25 mm e 0,50 mm tivessem uma participação melhor no processo.

IX.2.3 – SUBFRAÇÃO ADERENTE

Na subfração aderente (GRÁFICO 45), o minério que apresenta os maiores índices de crescimento e de granulação é o minério GI 0166, com exceção do índice Gi (4). Esse melhor comportamento do minério deve-se provavelmente, à característica morfológica das partículas primárias nessa subfração e também de sua característica mineralógica. A maior quantidade de umidade e também de coque adicionado à mistura, podem ter propiciado a maior nucleação da subfração aderente desse minério. O baixo índice de crescimento das micropelotas de 1,00 mm deve-se ao grande consumo das partículas primárias de 1,00 mm na geração das micropelotas de 2,83 mm.

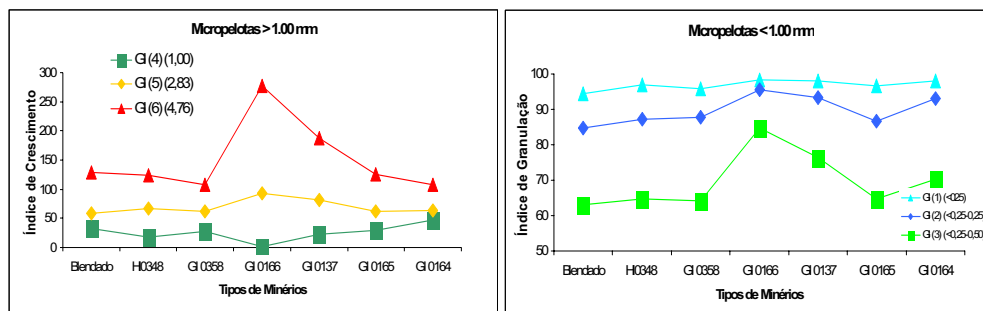


GRÁFICO 45 – Gráficos com os Índices de Crescimento das micropelotas > 1,00 mm (direita) e o Índice de granulação das micropelotas < 1,00 mm (esquerda) dos diferentes tipos de minérios na subfração aderente.

O minério com pior índice de crescimento Gi (6) é o GI 0164: é o que tem a menor quantidade de partículas primárias aderentes contribuindo para a geração dessas micropelotas. Isso deve ocorrer devido às suas partículas primárias aderentes serem formadas apenas por minerais isolados e de forma alongada, tornando difícil a sua aderência na superfície das partículas primárias nucleantes. No entanto, o seu melhor comportamento no índice Gi (4) deve-se, provavelmente, à maior participação das partículas primárias de 0,50 mm, cujas superfícies permitiram a aderência dessas partículas primárias.

O minério blendado é o que apresenta o menor índice de granulação das partículas menores de 1,00 mm (GRÁFICO 45). Esse resultado pode ter sido provocado pelas formas diferenciadas das partículas primárias mais finos dos

minérios que compõem o blendado, cuja diversidade de características não propiciam uma boa capacidade de aderência nas partículas primárias nucleantes.

Dentre os minérios individuais, os que apresentaram menores índices de granulações foram o GI 0358 nos Gi (1) e Gi (3) e o GI 0165 no Gi (2): esse comportamento pode ter sido provocado pela baixa quantidade de partículas mais finas presentes nas frações aderentes desses minérios.

IX.2.4 – ÍNDICE DE CRESCIMENTO E DE NUCLEAÇÃO

Na FIGURA 109, observa-se o comportamento dos minérios nas suas diferentes subfrações durante o processo de microaglomeração.

A observação da FIGURA 109 indica que, a maior parte dos minérios, apresenta comportamento bastante semelhante nos índices de granulações menores que 1,00 mm, independente da subfração utilizada. Na geração das micropelotas maiores que 1,00 mm mostram diferenciações significativas. Neste último caso, podem ser observadas as seguintes diferenciações: (i) alguns minérios mostram comportamentos bastante semelhantes, independentes das subfrações utilizadas; (ii) outros têm comportamento semelhante em duas subfrações e outra bastante diferenciada; e (iii) os demais apresentam comportamento bastante distinto para todas subfrações.

O minério blendado, como dito anteriormente, é utilizado para comparação do comportamento dos outros minérios. Dentre os minérios estudados, o GI 0358 é o minério que mostra comportamento mais próximo do minério blendado. O minério GI 0358 apresenta outra característica interessante; independente da subfração estudada, os comportamentos dos índices de granulação não variam e os índices de crescimento do Gi (5) e Gi (6) mostram apenas uma pequena diferenciação.

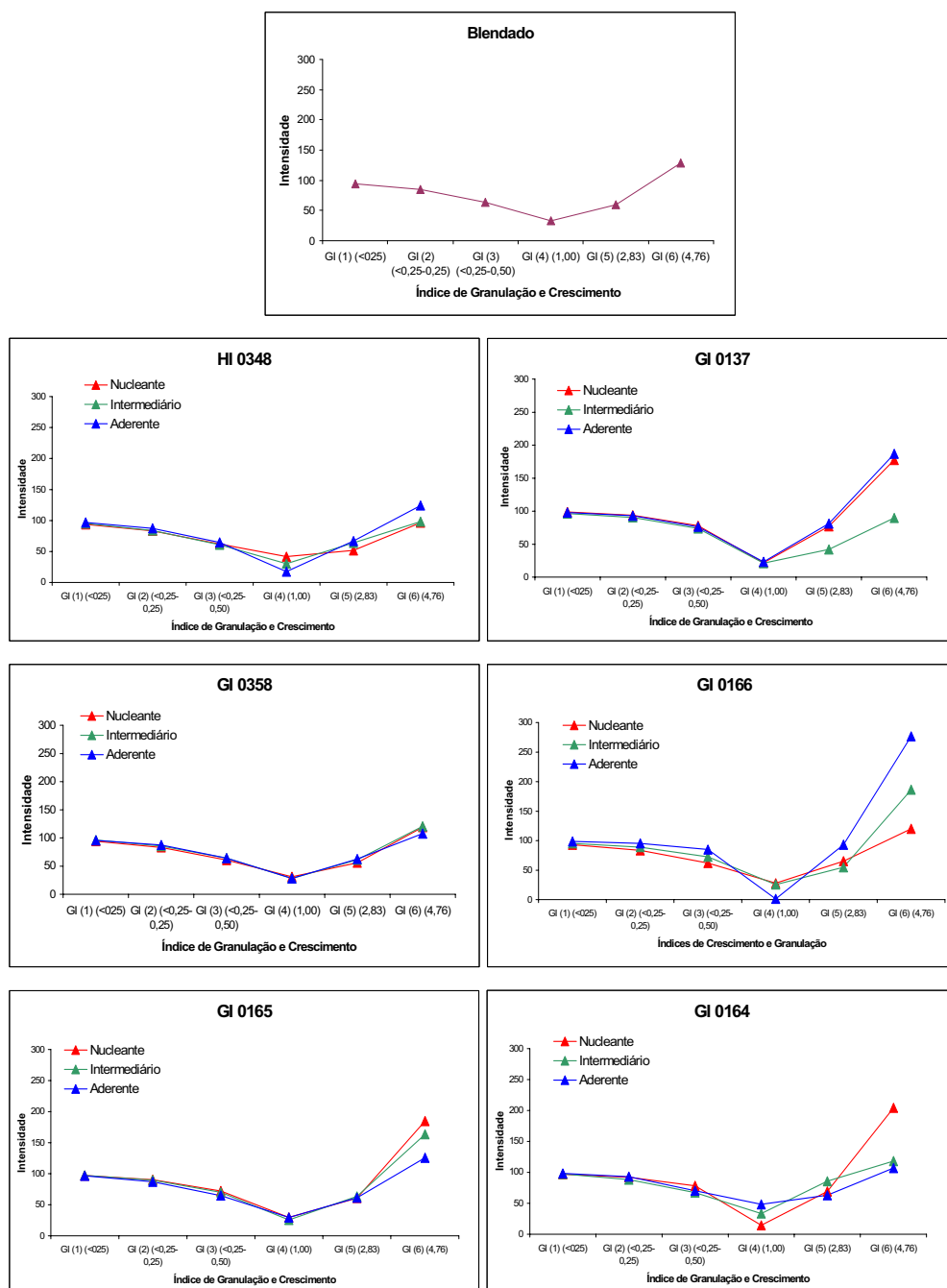


FIGURA 109 – Comportamentos durante o processo de microaglomeração dos minérios e suas respectivas subfrações.

O minério GI 0165 também apresenta o mesmo comportamento do Gi (1) ao Gi (5) para todas as suas subfrações, com valores diferenciados para o Gi (6). No Gi (6), a subfração nucleante desse minério é a que apresenta o maior valor

e a subfração aderente o menor valor, demonstrando que, a primeira é mais eficiente em nuclear as micropelotas maiores.

O minério GI 0137 apresenta valores semelhantes para todas as suas subfrações do Gi (1) até o Gi (4), com valores diferenciados para o Gi (5) e Gi (6). Nessas micropelotas maiores, os índices de crescimento das subfrações nucleantes e aderentes são praticamente iguais e maiores que os da subfração intermediária. Isso deve-se, provavelmente, à menor quantidade da subfração intermediária na mistura. Os índices maiores e iguais para as subfrações nucleantes e aderentes mostram que as subfrações desse minério têm o mesmo comportamento e rendimento na geração das micropelotas maiores.

O minério HI 0348 apresenta pequenas variações nos índices Gi (1) ao Gi (3) nas três subfrações. A subfração aderente apresenta índices ligeiramente maiores que os demais. No Gi (4), a subfração nucleante tem índice maior e a subfração aderente índice menor; nos índices Gi (5) e Gi (6), essa relação se inverte. A subfração intermediária desse minério no Gi (4) é intermediária entre as duas outras e nos índices Gi (5) e Gi (6) tem o mesmo comportamento da subfração nucleante. Isso indica que a subfração aderente desse minério, no processo de microaglomeração, tem resultado melhor que as outras subfrações.

As três subfrações do minério GI 0164 mostram os índices Gi (1) e Gi (2) iguais; no índice Gi (3), a subfração nucleante apresenta-se um pouco maior que as demais. No Gi (4), a subfração aderente apresenta-se melhor. No índice Gi (5), a subfração intermediária tem o melhor índice, a subfração aderente o pior. A subfração nucleante mostra o melhor índice de todos os minérios no Gi (6), com uma diferença acentuada sobre as outras duas e novamente, a subfração aderente, apresenta o pior índice. Esse comportamento ruim da subfração aderente, em relação às outras duas subfrações, deve-se provavelmente à forma angular e superfícies lisas das partículas primárias, como pode ser visto na FIGURA 63 E.

O minério que apresenta comportamento bastante diferenciado nos índices de granulação e crescimento das suas subfrações é o minério GI 0166. No índice Gi (1) ao Gi (3), a subfração aderente apresenta índices maiores e a subfração nucleante os menores índices e a subfração intermediária com índices intermediários; no Gi (4), a relação se inverte. No índice Gi (5), a subfração aderente passa, novamente a apresentar o melhor índice e a subfração intermediária o pior índice. A subfração aderente desse minério é o que tem o melhor índice Gi (6) de todos os minérios, indicando que é um bom minério para ser

utilizado como subfração aderente. A subfração nucleante desse minério é a que mostra o menor índice G_i (6); a subfração intermediária, índices intermediários e maior de todos os minérios.

A observação dos dados acima mostra que o minério com maior produção de micropelotas maiores varia de acordo com a subfração utilizada de cada minério. Assim, de todos os minérios, o GI 0164, na sua subfração nucleante, é o que apresenta o melhor comportamento e o GI 0166, nas suas subfrações intermediárias e aderentes são os que têm os melhores comportamentos nas respectivas subfrações. Ou seja, a composição para a obtenção da melhor mistura deveria conter o minério GI 0164 como subfração nucleante e o minério GI 0166 nas suas subfrações aderentes e intermediárias. Isso, se for observado apenas o critério de eficiência da mistura de minérios no processo de microaglomeração.

IX.3 – Distribuição das partículas primárias nas micropelotas

A distribuição das partículas primárias nas micropelotas é considerada ideal quando o minério gera maior quantidade de micropelotas maiores e consome a maior quantidade de finos.

A FIGURA 110 apresenta a distribuição das partículas primárias nas micropelotas, geradas pelo minério blendado. Esse minério foi utilizado como padrão para comparação com o desempenho dos demais minérios.

A observação do gráfico da FIGURA 110 indica que o minério blendado não apresentou bom índice de crescimento das micropelotas maiores, nem do consumo das partículas primárias mais finas.

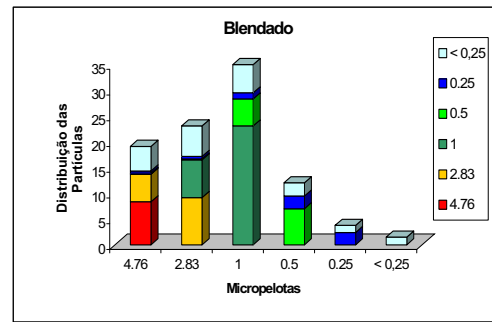


FIGURA 110 – Distribuição das partículas primárias nos diferentes tamanhos de micropelotas.

Os gráficos da FIGURA 111 mostram a distribuição das partículas primárias dos minérios estudados na sua subfração nucleante.

Os minérios que tiveram comportamentos mais próximos do ideal nessa subfração foram os GI 0164 e GI 0137. Pois, ao serem comparados com os demais minérios, esses minérios foram mais eficientes na geração de micropelotas maiores (de 4,76 mm e 2,83 mm); o minério GI 0137 também consumiu maior quantidade de partículas primárias mais finas. Essa melhor eficiência deve-se à sua capacidade de aderir às partículas primárias de 1,00 mm e 0,50 mm, melhorando a aderência das partículas mais finas na superfície das partículas nucleantes.

Os minérios com piores resultados foram o HI 0348 e o GI 0358, com menores quantidades de micropelotas maiores e grande quantidade de partículas mais finas que não participaram do processo de nucleação. No entanto, seus índices são melhores que os obtidos pelo minério blendado.

A FIGURA 112 apresenta os diferentes tipos de minérios estudados nas suas subfrações intermediárias.

A utilização dos dois critérios, acima citados, demonstra que o minério GI 0165 é o que apresenta melhor comportamento, visto que tem quantidades maiores de micropelotas de 4,76 mm e 2,83 mm e grande consumo das partículas primárias mais finas.

O minério GI 0166 teve também uma grande quantidade de micropelotas de 4,76 mm e 2,83 mm; no entanto, a quantidade de partículas primárias mais finas consumidas não foi muito eficiente, demonstrando ser um bom minério para a geração de micropelotas maiores.

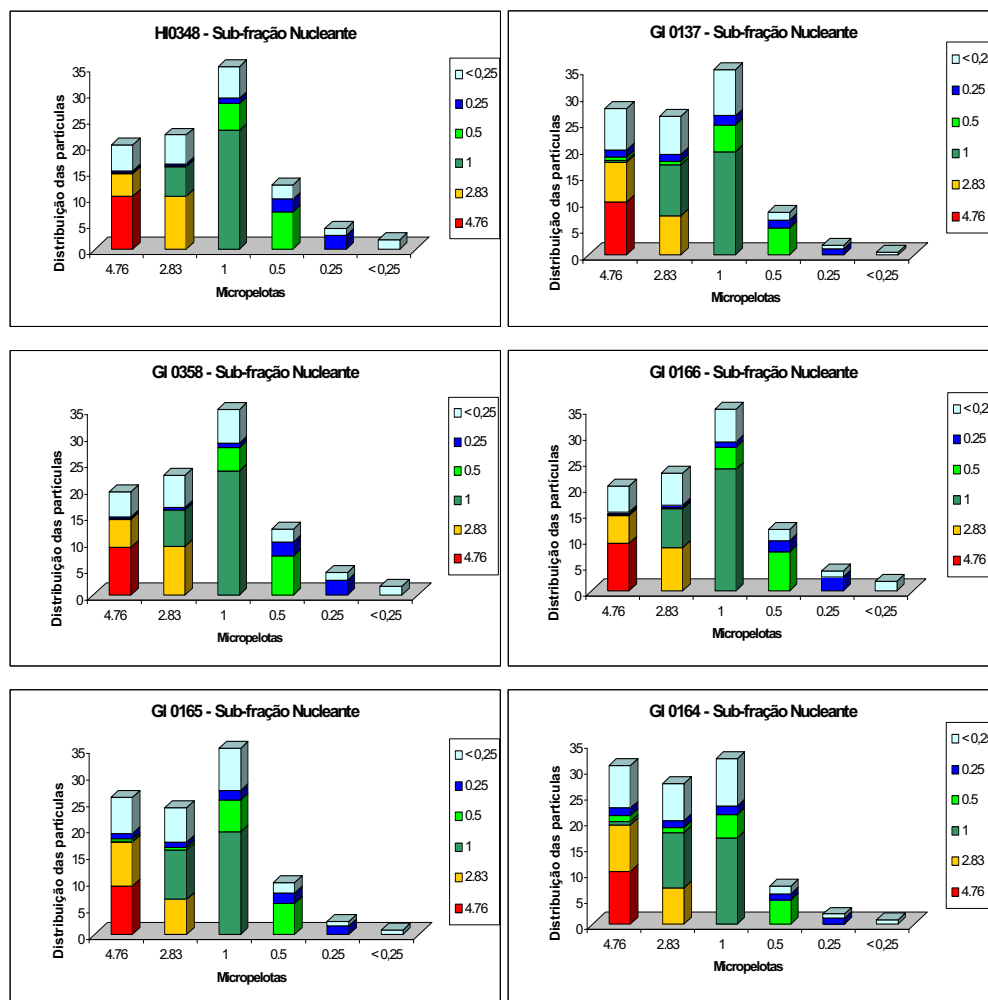


FIGURA 111 – Distribuição das partículas primárias nos diferentes tamanhos de micropelotas dos diferentes tipos de minérios na subfração nucleante.

Novamente, o minério HI 0348 é o que mostra o pior resultado dos minérios dessa subfração, visto que teve baixa geração de micropelotas maiores e uma alta quantidade de partículas primárias restantes. No entanto, os valores de seus índices são melhores que do minério blendado.

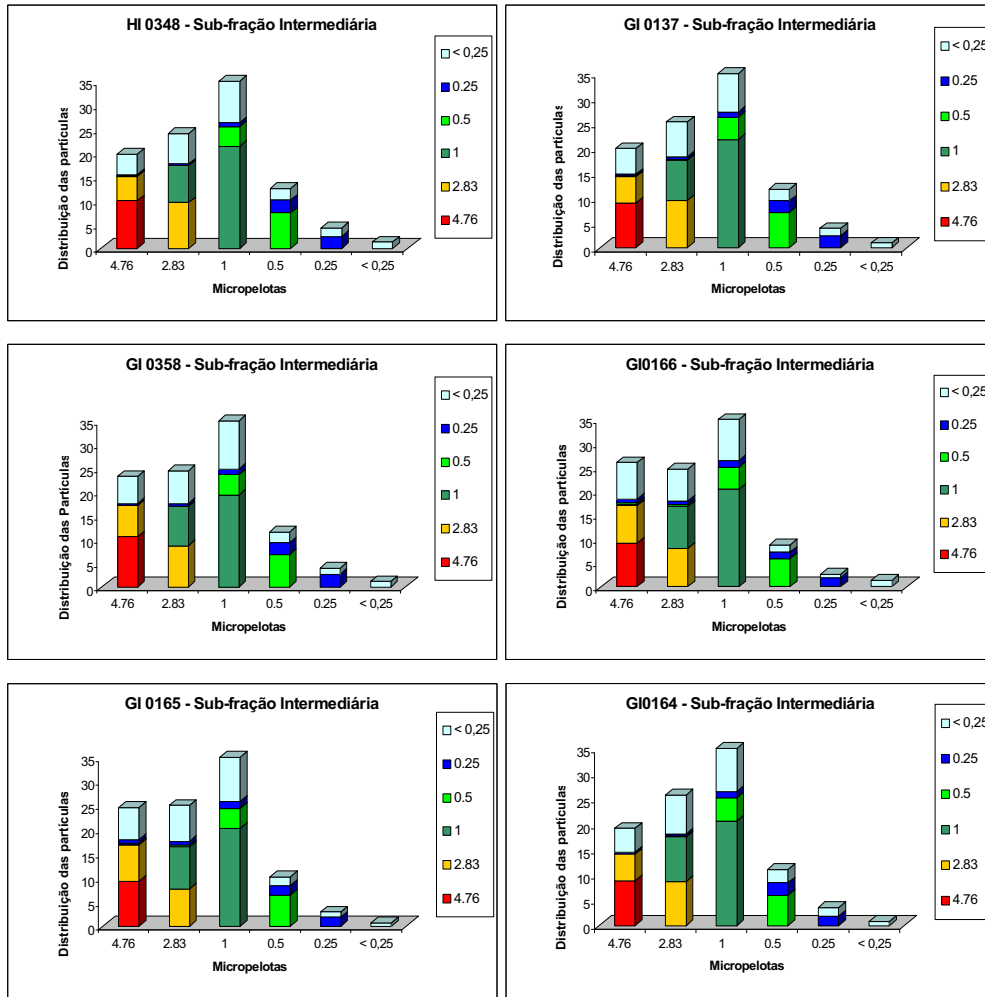


FIGURA 112 – Distribuição das partículas primárias nos diferentes tamanhos de micropelotas dos diferentes tipos de minérios nas suas subfrações intermediárias.

A FIGURA 113 mostra a distribuição das partículas primárias nas micropelotas geradas pelas subfrações aderentes dos diferentes tipos de minérios. A utilização dos critérios para avaliar a eficiência do processo de nucleação demonstra que o minério GI 0166 é o que apresenta o melhor comportamento de crescimento das micropelotas; além disso, é o que mais contém partículas primárias de 1,00 mm e 0,50 mm participando da geração dessas micropelotas de 4,76 mm e 2,83 mm.

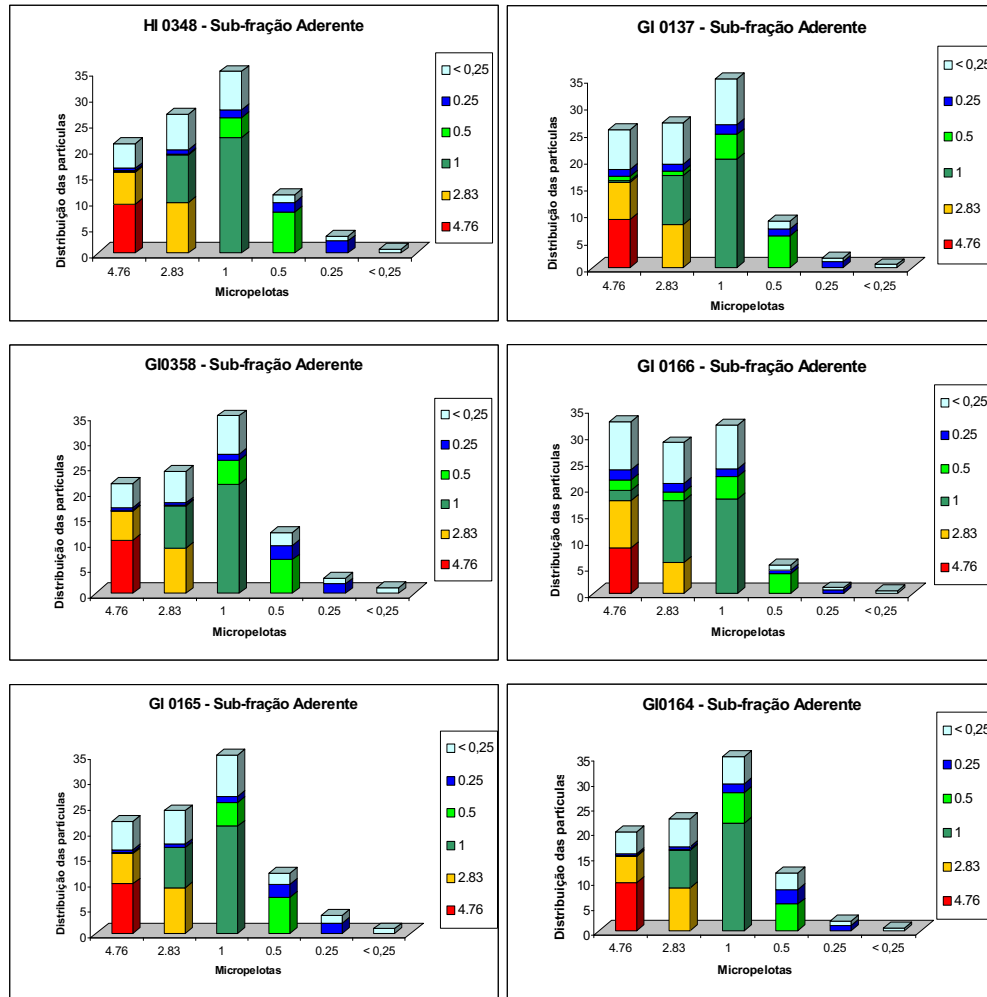


FIGURA 113 – Distribuição das partículas primárias nos diferentes tamanhos de micropelotas dos diferentes tipos de minérios na sua subfração aderente.

O minério de pior desempenho de nucleação de partículas maiores é o GI 0164; no entanto, é um dos melhores minérios no consumo das partículas primárias mais finas. Esse maior consumo deu-se na geração das micropelotas de 0,50 mm. E o minério GI 0358 é o de pior desempenho no consumo das partículas mais finas.

A observação dos gráficos com as médias de crescimento das micropelotas maiores que 1,00 mm (soma das micropelotas geradas de 1,00 mm, 2,83 mm e 4,76 mm) e o grau de granulação das partículas primárias finas menores que 1,00 mm (soma das partículas primárias de 0,50 mm, 0,25 mm e <0,25 mm) mostra que os níveis de queima têm uma correlação negativa entre esses dois índices (FIGURA 114). Isso deve ser esperado, pois o aumento no tamanho das

micropelotas é dado pelo maior consumo das partículas mais finas: são as responsáveis pelo crescimento das micropelotas (ABOUZEID & SEDDIK, 1981; LITSTER & WATERS, 1990; BENTES et al., 1994; HINKLEY et al., 1994; VENKATARAMANA et al., 1999; entre outros).

O estudo do processo de microaglomeração, através da observação dos índices de granulação e crescimento e a distribuição das partículas primárias nas micropelotas geradas, indica que as características morfológicas e texturais das partículas primárias de minérios, nas suas diferentes partículas primárias, influenciam no comportamento de cada tipo de minério durante esse processo.

As subfrações dos minérios com melhores resultados do processo de microaglomeração foram: GI 0166A, GI 0164N, GI 0165N, GI 0165A e GI 0166I; os minérios com os piores resultados desse processo foram: HI 0348I, GI 0358N, HI 0348N, GI 0166N e o blendado.

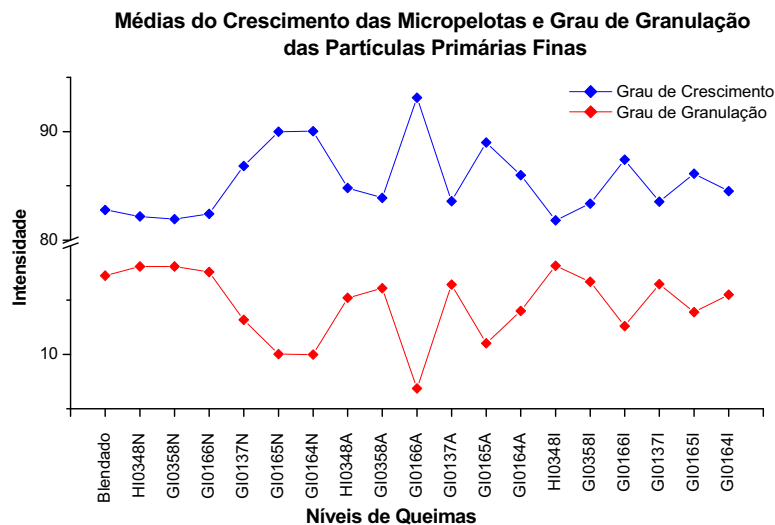


FIGURA 114 – Média de crescimento das micropelotas e grau de granulação dos diferentes níveis de queimas realizadas no presente estudo. (N – Subfração Nucleante; I – Subfração Intermediária; e A – Subfração Aderente).

Como pode ser visto, na subfração aderente, os minérios com alto grau de deformação e uma mineralogia mais diversificada (caso do minério GI 0166) têm um comportamento melhor durante o processo de microaglomeração, enquanto que os minérios menos deformados apresentam um comportamento pior

durante esse mesmo processo. A mesma correlação não pode ser observada na subfração nucleante, pois o minério GI 0166N mostra um fraco desempenho. Isso demonstra que os minérios se comportam de forma diferenciada nas suas diferentes subfrações.

Os resultados do processo de microaglomeração refletem as características das formas das partículas primárias e das mineralogias e texturas apresentadas pelas partículas primárias de minérios que exercem uma forte influência no processo de microaglomeração.

As características intrínsecas do minério GI 0166, são responsáveis pelos resultados diferenciados obtidos pelas suas três subfrações estudadas, durante o processo de microaglomeração. Na subfração nucleante, esse minério mostrou baixo grau de nucleação, devido ao seu alto grau de porosidade. Apesar de apresentar superfície rugosa e essa permitir a adesão das partículas primárias mais finas, o teor de umidade utilizado, aliado ao tamboramento, durante o micropelotização, fragiliza essa adesão. Isso leva à diminuição do tamanho das micropelotas, aumentando a quantidade de partículas finas no processo.

Na subfração intermediária do minério GI 0166, o seu comportamento foi melhor que a subfração nucleante. Essa subfração do minério participaria em maior escala na primeira etapa de nucleação, conforme descrito por LITSTER & WATERS (1990), ou seja, seriam nucleantes das partículas mais finas e as micropelotas geradas, posteriormente, adeririam na superfície das partículas nucleantes formando as micropelotas maiores. Essa participação secundária no processo demonstra que é um bom minério para ser utilizado como partículas intermediárias, visto que foi o melhor minério dessa subfração.

A participação do minério GI 0166, como subfração aderente, demonstra que as suas partículas mais finas são boas para aderirem nas partículas nucleantes e intermediárias. Esse bom comportamento deve-se à distribuição homogênea no tamanho das partículas aderentes, mostrando-se como o nível de queima de melhor desempenho nesse processo de microaglomeração de todos os níveis estudados.

Os minérios hematíticos (GI 0165 e GI 0164) com alto grau de deformação são os que apresentaram os melhores resultados como subfração nucleante. Esse comportamento melhor deve-se, provavelmente, às características superficiais das partículas primárias, visto que a sua superfície apresenta uma

rugosidade bem distribuída, além de se apresentarem de forma mais angulosa. O tipo de superfície apresentada por esses minérios permite melhor adesão das partículas mais finas sobre a mesma.

Os minérios com menor grau de deformação (HI 0348 e GI 0358) foram os que apresentaram os piores comportamentos durante o processo de microaglomeração. Os comportamentos desses minérios estão associados à forma das suas partículas primárias nas diferentes subfrações, como pode ser visto na FIGURA 100, visto que se comportam melhor como subfração aderente que nas outras duas subfrações. Isso ocorre porque são minérios de granulação dos minerais mais finos, permitindo a sua adesão em superfícies de variados graus de rugosidade. Enquanto que, como subfração nucleante, a rugosidade apresentada pelas suas partículas primárias é muito pequena, ou seja, de concavidade muito pequena, não permitindo a adesão de qualquer tamanho de partículas, tornando o processo de nucleação mais seletivo.

O minério GI 0137 apresenta um comportamento intermediário em todas as subfrações estudadas. É um minério hematítico de baixo grau de deformação. Como partículas nucleantes observa-se que seu comportamento é próximo dos minérios hematíticos; como partículas intermediárias o seu comportamento é intermediário, como partículas aderentes, apresenta o pior comportamento dessa subfração.

Assim, conclui-se que, os minérios hematíticos (GI 0164, GI 0165 e GI 0137) são os que apresentam como melhores minérios para comporem a subfração nucleante. Para comporem a subfração intermediária, os melhores minérios são GI 0166 e GI 0164; para a subfração aderente, os minérios GI 0166; GI 0164 e GI 0165.

Então, os minérios que se encontram entre os melhores minérios em todas as suas subfrações são GI 0164 e GI 0165. Os minérios para apresentarem um bom desempenho durante o processo de microaglomeração deveriam ter as características apresentadas por esses minérios: partículas primárias resistentes, superfície com rugosidades angulares e profundas, distribuição homogênea nos tamanhos das partículas mais finas.

A utilização do minério hidratado auxilia na aglomerabilidade da mistura e em quantidades adequadas pode otimizar a produtividade das misturas dos minérios hematíticos, podendo reduzir o consumo dos combustíveis devido à

sua alta fusibilidade e até aumentar a redutibilidade do sinter. Assim, o minério GI 0166 seria adequado para ser utilizado como partículas aderentes e até intermediária, visto que a sua concentração de minerais hidratados e as impurezas presentes nesses minerais não prejudicariam o processo, pois, além de fazerem parte da escória, auxiliariam na formação da fase líquida e dependendo de sua quantidade pode aumentar a resistência a quente do sinter.

IX.4 – Testes de Sinterização

Os resultados obtidos nos 19 níveis de queima nos testes de sinterização demonstram algumas correlações interessantes. As maiores diferenciações entre os parâmetros estudados nos diferentes minérios são observadas nas subfrações nucleantes e aderentes; em menor escala, na subfração intermediária. Esse fato deve-se à participação diferenciada de cada subfração nas misturas a sinterizar.

Alguns parâmetros observados podem ser correlacionados diretamente com a composição mineralógica do minério: PSC, densidade da carga versus tempo de sinterização e *coke rate*. Os testes de qualidade do sinter estão associados às características diferenciadas de cada tipo de minério, onde algumas são propícias para uns testes e ruins para outros e vice-versa.

As características como a forma das partículas primárias e a rugosidade da superfície são dependentes do tamanho dos cristais e arranjo dos minerais, Pr e também da mineralogia, apresentada por cada tipo de minério. Essas características interferem nos testes de qualidade do sinter.

A composição mineralógica reflete na maior diferenciação que ocorre na subfração nucleante, principalmente, nos parâmetros de PSC e densidade de carga, devido à sua maior participação na mistura.

Os resultados de PSC mostram que os minérios hematíticos são mais densos e os minérios com algum grau de hidratação menos densos. A maior densidade dos minérios hematíticos deve-se à sua mineralogia única e também ao grau de porosidade.

O minério GI 0166, além de ser bastante poroso, possui variados graus de hidratação. É o minério que apresenta o menor PSC, conseqüentemente, a menor densidade de carga; leva o menor tempo de sinterização. Esse comportamento, obviamente, está associado aos tipos de partículas primárias apresentadas por este minério.

Na subfração aderente, a composição mineralógica não apresenta uma relação direta entre o PSC e a densidade de carga dos minérios. Isso provavelmente ocorre, devido à sua menor participação na mistura e, talvez, pelo pequeno tamanho das partículas primárias, cuja diferença na densidade entre os minérios não seja grande.

Na subfração intermediária, a diferença no PSC entre os diferentes minérios não é acentuada, provavelmente, devido à sua pequena participação na mistura.

A taxa de coque adicionada na mistura, além de outros fatores, está associada ao teor de PPC. Os minérios com PPC maiores precisam de maiores quantidades de coque, para obterem a mesma taxa de finos de retorno que os outros minérios. A quantidade de coque adequada auxilia na resistência do sínter.

O minério GI 0166 foi o que utilizou maior quantidade de coque em todas as suas subfrações. Essa maior quantidade deve-se, provavelmente, ao teor de PPC e ao balanço em relação aos finos de retorno do sínter gerado. Enquanto que, o minério GI 0358 foi o que menos utilizou coque, provavelmente, devido à presença de FeO das Mg, pois durante a transformação da Mg para hematita há liberação de calor, auxiliando o processo de sinterização.

Os finos de retorno apresentam uma pequena variação entre os diferentes minérios nas suas diferentes subfrações. A maior quantidade de coque no minério GI 0166I fez com que esse nível de queima tenha a menor taxa de finos de retorno, juntamente com o minério blendado, seguido do GI 0358N.

Os níveis de queima com maiores quantidades de finos de retorno são o HI 0348N e o GI 0137A, indicando que esses níveis são mais frágeis que os demais.

O nível de queima mais produtivo é o GI 0165A, seguido do HI 0348A; os piores são o GI 0358A e o GI 0164A. Apesar do seu baixo grau de crescimento e granulação, o minério HI 0348A apresentou uma excelente produtividade, demonstrando que a força de coesão das micropelotas geradas por esse minério eram maiores, tornando-as resistentes ao manuseio a frio.

A variação nos resultados de produtividade da subfração aderente, deve-se, provavelmente, à forma de participação dessa subfração no processo de nucleação das micropelotas. As características das partículas primárias dessa subfração podem auxiliar ou prejudicar a produtividade do processo de sinterização.

Os níveis de queima das subfrações nucleantes mostram que o minério GI 0358 é o menos produtivo e o GI 0137 é o mais produtivo. Na subfração intermediária, o minério HI 0348 é o menos produtivo; os mais produtivos são os minérios GI 0137 e GI 0165.

Nesse estudo, a produtividade está associada às características das subfrações estudadas, principalmente as aderentes, visto que é a subfração que apresenta o maior e o menor valor de todos os níveis de queima estudados. O que implica, numa observação mais detalhada de quais características dos tipos de minérios acentuariam a sua qualidade para ser utilizada nessa subfração aderente.

Os minérios com piores resultados são os que têm quantidades maiores de minerais hidratados, bem como diversidade maior dos minerais presentes, como o caso dos minérios GI 0166 e HI 0348. Assim as subfrações aderentes desses minérios apresentam uma diversidade maior de tipos de partículas primárias. Essa heterogeneidade nos tipos de partículas primárias dessa subfração pode ser responsável pela geração de sínter mais frágil, pois não permitiria uma melhor adesão nas partículas primárias nucleantes.

Os resultados dos testes de tamboramento demonstram que o minério GI 0137 é o que apresenta valores maiores e o HI 0348, os menores valores nas respectivas subfrações estudadas. O maior valor, de todos os níveis de queima é dado pelo minério GI 0137N e o menor valor pelo HI 0348I. Nas três subfrações estudadas, observa-se que os minérios hematíticos apresentam, em média, valores maiores que os minérios com algum grau de hidratação.

O minério GI 0358, nos testes de tamboramento, apresenta valores próximos aos minérios hematíticos nas subfrações nucleante e aderentes; na subfração intermediária tem o menor valor de todos os níveis de queimas, enquanto que o minério GI 0166 apresenta os valores próximos aos minérios hematíticos nas subfrações intermediárias e aderentes e o menor valor na subfração nucleante. O minério blendado, nesse teste, apresenta o segundo melhor resultado, sendo apenas menor que o minério GI 0137N.

Nos testes de RDI, observa-se que os minérios hematíticos apresentam comportamentos superiores aos minérios com algum grau de hidratação. A variação é maior nos níveis de queima da subfração aderente, onde é encontrado o minério HI 0348 com o pior desempenho; o GI 0166 com um dos melhores desempenhos. Os níveis de queima da subfração intermediária são próximos da média, indicando que não apresentam bons resultados nesse teste.

Os minérios com melhores desempenhos de todos os níveis de queima nos testes de RDI, são: GI 0164N, GI 0166A e GI 0137N. O minério blendado apresenta um dos piores desempenhos, juntamente com o minério GI 0165N.

Os índices de redutibilidade obtidos pelos níveis de queima realizados demonstram que, na média, a subfração intermediária dos minérios é a que apresenta os melhores resultados; os minérios da subfração aderente, os piores resultados. O minério HI 0348 tem o melhor resultado desse teste com a sua subfração nucleante (juntamente com o GI 0137I); o pior resultado, com a sua subfração aderente, de todos os níveis de queima estudados. Para aumentar a redutibilidade da mistura, o minério HI 0348 seria bom de ser utilizado como subfração nucleante apenas, visto que as suas outras subfrações têm um baixo grau de redutibilidade.

O minério blendado mostra um comportamento mediano entre os níveis de queima. O minério GI 0164 apresenta um comportamento razoável nas subfrações nucleantes e intermediárias e um comportamento abaixo do esperado na subfração aderente. O minério GI 0358 tem o melhor resultado na subfração aderente e o segundo melhor na subfração nucleante. O minério GI 0165 apresenta um comportamento ruim na subfração nucleante e um bom comportamento na subfração aderente.

A avaliação do grau de redutibilidade a 1000 °C (temperatura que precede o início do amolecimento) mostra que em cada subfração estudada podem ser observados dois grupos distintos: (i) os minérios com contribuição hidratada apresentam maior perda de O₂ nas subfrações nucleantes e intermediárias; (ii) os minérios hematíticos têm maior perda de O₂ na subfração aderente.

A observação dos testes de qualidade dos níveis de queima, realizados no presente estudo, permite concluir que a variação entre o pior e o melhor resultado não demonstra uma diferença tão significativa que possa excluir a utilização de algum dos minérios estudados.

Todos os minérios estudados apresentaram resultados satisfatórios, sendo possível à sua utilização dentro do padrão de qualidade exigido por qualquer empresa siderúrgica. No entanto, a obtenção da mistura que tenha melhor rendimento do processo, isso deve ser buscado, sendo que nesse trabalho, observou-se que os diferentes minérios nas suas diferentes subfrações têm comportamentos diferenciados.

O conhecimento da relação entre as características intrínsecas dos minérios e o seu comportamento durante os testes de qualidade torna possível a projeção do resultado a ser esperado, quando utilizar um determinado tipo de minério com as características aqui estudadas.

Em termos gerais, o comportamento dos minérios que possuem uma composição com quantidades variáveis de minerais hidratados difere daquele dos minérios que são compostos apenas pelo mineral hematita. Geralmente, os minérios com algum grau de hidratação têm uma mineralogia mais variada, como visto pelos minérios aqui estudados.

O minério HI 0348 tem diferentes gerações de minerais hidratados, bem como diferentes gerações de hematita e formas de ocorrência dessas hematitas, conferindo uma certa heterogeneidade mineralógica e textural ao minério. Enquanto que, no minério GI 0358, o Mh é produto apenas da Mg e, geralmente, ocorre associado aos cristais de Mt, em menor escala há a presença de hematita secundária; a mineralogia desse minério não é tão diversificada. E o mineral GI 0166 é o que apresenta mineralogia mais variada de todos os minérios estudados, com Mg, Mt, Hr, HI e gerações diferenciadas de Mh; além disso, apresentam Mg com diferentes intensidades de martitização.

Os minérios hematíticos podem ser divididos em: (i) baixo grau de deformação, minério GI 0137; e (ii) grau médio a alto de deformação, como o caso dos minérios GI 0165 e GI 0164. Esses minérios são compostos basicamente de hematitas, sendo que no primeiro tipo são compostos de hematitas granulares e cristais pequenos. Enquanto que, o minério de grau de deformação médio a alto, minério GI 0165, apresenta cristais de hematitas granulares grandes. E no minério de alto grau de deformação, o minério GI 0164, os cristais de hematitas são lamelares e grandes. A ocorrência de diferentes formas da hematita provoca os comportamentos diferenciados desses minérios, desde o processo de microaglomeração até os testes de qualidade do sinter gerado. Isso indica que, a mineralogia e textura apresentadas pelo minério influem no processo de sinterização.

IX.5 – Características de cada Tipo de Minério

Abaixo serão colocadas as características importantes apresentadas e observadas em cada minério durante os processos de microaglomeração e sinterização, ressaltando as qualidades e defeitos apresentados em cada minério.

IX. 5.1 – MINÉRIO BLENADO

O minério blendado nos parâmetros estudados mostrou comportamento geralmente intermediário entre os melhores e piores resultados. Isso indica que a mistura dos minérios, em determinadas situações estudadas, pode ter suas propriedades ressaltadas ou não, sendo necessário uma adição maior ou menor de minérios mais adequados ao processo de sinterização.

No processo de microaglomeração, os índices de crescimento e de granulação apresentados pelo minério blendado foram intermediários. Esse minério mostrou boa distribuição das partículas primárias nas micropelotas geradas. Geralmente, quando há contribuição das partículas primárias intermediárias na geração das micropelotas maiores, essas apresentam um maior crescimento. Esse fato, não foi observado nesse minério, pois apresenta uma contribuição muito pequena das partículas intermediárias.

O minério blendado é composto pela mistura em partes iguais dos minérios estudados, como era de se esperar; algumas propriedades dessa mistura mostram valores intermediários aos dos outros minérios estudados, por exemplo, o seu PSC, densidade de carga, tempo de sinterização e produtividade. O teor de coque utilizado no minério blendado, encontra-se entre os menores valores, juntamente com o minério GI 0358.

Nos testes de caracterização metalúrgica, esse minério encontra-se acima da média, conforme pode ser visto no Capítulo VIII. Esse resultado acima da média, deve-se, provavelmente, pela variação das características apresentadas pelos diferentes minérios presentes nessa mistura. Apesar de ocorrer sobreposição e interferências de características, o comportamento global foi para melhor.

IX.5.2 – MINÉRIO HI 0348

O minério HI 0348 é um minério microcristalino com determinado grau de porosidade. As partículas primárias têm superfícies rugosas, que formam pequenas reentrâncias pouco profundas. Na matriz microcristalina, encontram-se porções granulares com cristais maiores de Hr e/ou HI, de origem secundária e em algumas partículas primárias mostra-se bandada, com bandas mais compactas e mais porosas. As fraturas podem estar preenchidas ou não por cristais Hr e/ou HI. Além disso, ocorre em algumas partículas primárias a presença de Mh, associado à matriz microcristalina ou preenchendo fraturas. Essa característica, diferenciada apresentada pelas partículas primárias maiores e menores, pode conferir alguns resultados obtidos por esse minério.

Esse minério tem um baixo índice de crescimento e nucleação das micropelotas, principalmente, nas suas subfrações nucleantes e aderentes, provavelmente, por estarem associadas ao tipo de superfície das partículas primárias no caso da primeira e pela textura apresentada pelo minério, no caso da segunda.

O PSC, bem como, densidade de carga e tempo de sinterização desse minério, são os menores. O teor de coque utilizado é menor que a média nas subfrações nucleante e intermediária e na subfração aderente é um dos mais altos.

O interessante desse minério é com relação aos parâmetros de qualidade do sinter nas diferentes subfrações estudadas. Essas apresentam algumas particularidades individuais.

A subfração nucleante desse minério apresenta o maior índice de redutibilidade dessa subfração e o segundo melhor do estudo. Isso pode ter ocorrido devido ao início precoce e mais alto do processo de combustão, como pode ser visto pela FIGURA 01 (ANEXO III), cuja vazão de ar é maior que os demais minérios. Outro ponto a destacar é o início do aumento da temperatura, que se inicia antes dos demais minérios, cuja temperatura máxima é a menor que os demais minérios. Estes aspectos podem ter levado à menor resistência dessa subfração do minério, gerando alta quantidade de finos de retorno.

Com relação a subfração intermediária desse minério, os testes de resistência mecânica do sinter são baixos, o RDI é alto e o grau de redutibilidade é alto. Nessa subfração, a vazão de ar é semelhante aos demais minérios, apesar de iniciar o aumento da temperatura do ar junto com os demais minérios, este é

menor, como nas outras subfrações desse mesmo minério. A sua produtividade é a menor dessa subfração.

Na subfração aderente, esse minério apresenta um alto índice de redução à degradação, além de uma baixa redutibilidade e resistência ao tamboramento, ou seja, produz um sinter frágil. Esse comportamento ruim também pode estar associado à maior vazão de ar e à menor temperatura, como visto na FIGURA 01 (ANEXO III). O aumento da vazão de ar e o aumento da temperatura de sinterização iniciam antes dos demais minérios. O comportamento apresentado por essa subfração permitiu a geração de maior quantidade de finos de retornos. Em termos de produtividade, no entanto, é o segundo melhor de todos os níveis de queima realizados.

A maior vazão de ar nas subfrações nucleantes e aderentes pode ter provocado a geração preferencial de trincas pela contração do bolo de sinter. Isso ocorreu, devido ao alto PPC desse minério, que favorece a geração de trincas. Na subfração intermediária esse processo não foi tão efetivo, devido à sua pequena participação na mistura.

A redutibilidade desse minério varia de uma subfração para outra, sendo maior na nucleante e intermediária. O grau de redutibilidade está associado ao tamanho e à forma dos cristais de minerais e Pr. Assim, o comportamento desse minério era esperado, pois nessas subfrações mais grossas, as partículas primárias apresentam a mineralogia microcristalina e a porosidade é bem distribuída, facilitando o processo de redução. Enquanto que, na subfração aderente, apesar de ter pequenas partículas primárias, esses se desfragmentam com facilidade, gerando grande quantidade de minério muito fino. Isto prejudica os índices dos testes de redução sendo também, responsáveis pelo alto RDI.

Em resumo, pode-se dizer desse minério, que a subfração nucleante apresenta um bom índice de redutibilidade, com produtividade, resistência mecânica e características metalúrgicas intermediárias aos outros minérios, mas com alta produção de finos de retorno; a subfração intermediária mostra também um bom índice de redutibilidade, mas com menores valores de produtividade e resistência mecânica e valor maior de RDI que os minérios da mesma subfração; a subfração aderente apresenta resultados ruins nos testes de qualidade do sinter, sendo o pior ou ficando abaixo da média dos demais minérios. No entanto, essa última subfração apresenta a segunda mais alta produtividade de todos os níveis de queima.

Esse comportamento contraditório da subfração aderente deve-se à maior diferença entre a temperatura de amolecimento e a temperatura final de fusão do minério, pois é o único fator que diferencia dos outros minérios.

IX.5.3 – MINÉRIO GI 0358

Esse minério é de baixo grau de deformação, composto predominantemente de hematita, formado através do processo de martitização da Mg. A Mg, também se transforma em Mh, através do processo de hidratação; esse processo ocorre de forma heterogênea com distribuição irregular. É interessante notar que o seu PPC é baixo na subfração nucleante e alto na subfração aderente, enquanto que o teor de FeO apresenta teores bem maiores na subfração nucleante e teores menores na subfração aderente. A presença de resquícios de Mg é responsável pela menor quantidade requerida de coque durante o processo de sinterização, visto que a transformação da Mg para hematita ocorre numa reação exotérmica.

A subfração nucleante desse minério apresenta um dos menores índices de geração de micropelotas maiores. Esse comportamento de nucleação deve-se, provavelmente, ao tipo de partícula primária e superfície apresentada por esse minério. A superfície de contorno das partículas primárias é rugosa, com reentrâncias maiores de curvatura suave, não favorecendo a deposição das partículas mais finas.

Os testes de qualidade do sinter, da subfração nucleante são intermediários aos demais minérios, com bom grau de redutibilidade. Provavelmente, devido à presença de FeO nessa subfração ser alta, a sua produtividade é uma das menores de todos os níveis de queima. A vazão do ar é baixa, enquanto que a temperatura do ar que entra nas caixas é intermediária aos demais minérios.

A baixa produtividade da subfração nucleante desse minério, pode ser devido à pequena diferença entre a temperatura de amolecimento e a temperatura de fusão final do minério, pois é um fator bastante diferenciado dos outros minérios e que pode indicar esse comportamento. Além disso, esse minério apresenta temperatura maior de amolecimento e temperatura de sinterização mais baixa.

Na subfração intermediária, o minério tem comportamento de micropelotamento abaixo da média dos demais minérios. Os resultados do processo de sinterização apresentam que a sua produtividade e quantidade de finos de retorno são menores que a média de todos níveis de queima, no entanto a quantidade de coque, juntamente com o minério GI 0137I, é a menor de todos os níveis de queima.

Os testes de qualidade do sinter, gerado da subfração intermediária desse minério, apresentam comportamentos variados. A comparação com os demais níveis de queima, demonstra que o teste de queda é abaixo da média; o teste de tamboramento é o pior; o RDI é um dos mais altos; a redutibilidade encontra-se acima da média. Portanto, pode-se observar que, segundo alguns testes esse minério, pode ser utilizado nessa subfração, enquanto em outros esse minério nessa subfração não é adequado.

O gráfico da vazão de ar desse minério da subfração intermediária mostra que a frente de combustão ocorreu depois que os demais minérios, visto pelo deslocamento à direita de sua curva na FIGURA 01 (ANEXO III), no entanto foi o que atingiu a mais alta temperatura nas caixas de ar. Essa temperatura alta pode ser observada no gráfico de amolecimento e fusão, onde esse minério apresenta a mais alta temperatura de fusão do processo de sinterização, além de apresentar a maior diferença entre a temperatura de amolecimento e a temperatura de fusão. Isso deve ter ocorrido, pelo fato de as partículas primárias dessa subfração se encontrarem englobadas pelas partículas mais finas e/ou aderidas nas partículas primárias. Essas características fazem com que haja retardamento para ser sinterizado e após ser desencadeado o processo de sinterização; este atinge uma temperatura maior devido à presença de FeO no minério.

A subfração aderente deste minério apresenta bons índices de qualidade do sinter gerado, como pode ser no Capítulo VIII. Esse minério mostra-se melhor nos testes de queda e redutibilidade, o segundo melhor teste de RDI e o terceiro de tamboramento dessa subfração. Como pode ser visto, é um excelente

minério para ser utilizado como subfração aderente se observar estes critérios. A vazão de ar desse minério é a mais baixa e ocorre posteriormente com todos os minérios, indicando que a permeabilidade do leito não é boa. A temperatura dos gases é uma das mais altas e também apresenta uma elevação posterior aos demais minérios, pode estar associada à sua composição.

Os bons índices dos testes de qualidade do sinter gerado da subfração aderente desse minério; contradiz o seu desempenho no processo de micropelotamento. No entanto, o seu desempenho no processo de micropelotamento é responsável pelo comportamento apresentado por essa subfração, nas medidas de vazão de ar e temperatura dos gases.

Esse minério, em alguns parâmetros, apresenta comportamentos bastante diferenciados nas suas diferentes subfrações, enquanto que em outros os comportamentos apresentados são bastante semelhantes.

As temperaturas de amolecimento, sinterização e de fusão do minério é diferente para cada subfração, a subfração nucleante apresenta a maior temperatura de amolecimento e a menor temperatura de sinterização; a subfração aderente apresenta a menor temperatura de amolecimento; e a subfração intermediária apresenta a maior temperatura de sinterização e fusão.

Os testes de qualidade demonstram que a subfração nucleante e aderente apresentam comportamentos mais próximos e melhores que os da subfração intermediária. No entanto, a produtividade apresenta a correlação inversa, visto que nas subfrações nucleantes e aderentes apresentam as mais baixas produtividades de todos os níveis de queimas.

Os aspectos semelhantes são: o tempo de sinterização e o teste de queda estão entre os mais altos de cada subfração; o índice de granulação, o teor de coque, a vazão de ar estão entre os mais baixos. O maior tempo de sinterização, bem como a menor vazão do ar pode estar associada à menor quantidade de coque utilizada, que acarreta menor velocidade da frente de combustão, que pode ser acelerada pela transformação da Mg para a hematita.

Portanto, como pode ser visto, este minério apresenta características intermediárias, tanto no processo de microaglomeração quanto no processo de sinterização, produzindo sinter com qualidades intermediárias, ou seja, esse minério não apresenta qualidades que possam ser destacadas.

IX.5.4 – MINÉRIO GI 0166

O minério GI 0166 apresenta a maior quantidade de minerais, com gerações diferenciadas de hematita e Mh, de todos os minérios estudados. A origem desse minério é responsável pela variação mineralógica, gerando bandas mais ou menos porosas, cuja porosidade foi gerada pela lixiviação do Qz. No entanto, essa porosidade é intermediária aos demais minérios.

A presença de diferentes gerações de hematita indica que houve condições de tempo, temperatura e pressão necessárias para suas gerações. Nesse minério, tem-se a Mg com Mt associada, Hr, HI e Mh. A transformação da Mg para Mt apresenta-se com diferentes intensidades, bem como a transição da Mt para Hr. A HI, gerada a partir da Hr, pode estar orientada ou dispersa nas partículas primárias. O Mh ocorre tanto como produto da Mg como da Mt e Hr, sendo encontrado também formando uma matriz envolvendo outros minerais.

Esse minério apresenta algumas condições diferenciadas dos demais minérios estudados, como o teor de umidade e o de coque, para adequá-lo aos parâmetros fixados. O teor de umidade utilizado foi de 7%, enquanto para os demais minérios utilizaram 6%. E o teor de coque foi ligeiramente maior que os demais, pois, com menor quantidade de coque, gerava quantidade de finos de retorno maior que os demais minérios.

As condições diferenciadas, utilizadas por esse minério, já evidenciam que o mesmo apresenta comportamento abaixo do esperado, caso utilizasse as mesmas condições dos outros minérios. No entanto, é um minério de grande interesse, justamente por apresentar essa mineralogia diferenciada, principalmente pela presença de Mh, que pode auxiliar no seu rendimento nos parâmetros avaliados.

Nos testes de microaglomeração das diferentes subfrações deste minério, observa-se que a sua subfração nucleante tem o menor rendimento dessa

subfração; enquanto que as suas subfrações aderente e a intermediária, apresentam os melhores resultados de nucleação das respectivas subfrações.

Os resultados acima podem ser explicados pela grande quantidade de minerais hidratados e esses contribuem para maior geração de finos (SANTOS & BRANDÃO, 2003). Assim, a umidade mais elevada e maior quantidade de partículas mais finas propiciaram um maior tamanho das micropelotas (LITSTER & WATERS, 1990; DAWSON, 1993; VENKATARAMANA et al., 1999), resultando num melhor rendimento das subfrações aderente e intermediária. Com relação à subfração nucleante, a pequena curvatura das reentrâncias encontradas geram a rugosidade irregular observada na superfície da partícula primária, essas dificultam a deposição das partículas mais finas, não permitindo maior crescimento das micropelotas.

A maior presença de Mh diminui a densidade desse minério; pois o Mh é menos denso que a hematita e Mg. Assim, a diferença no PSC desse minério é mais sensível na subfração nucleante, onde a participação do minério é maior, apresentando o menor PSC de todos os níveis de queimas, bem como o tempo de sinterização também é menor.

A quantidade de finos de retorno da subfração nucleante é a segunda maior dessa subfração; na subfração aderente é uma das menores; e na subfração intermediária é a menor e também a menor de todos os níveis de queimas.

Os testes de resistências mecânicas, realizados nos sínteres gerados por cada subfração desse minério mostram comportamentos variados. A subfração nucleante tem o pior resultado no teste de queda de todos os minérios estudados e um dos piores no teste de tamboramento. A subfração intermediária apresenta a maior resistência mecânica das três subfrações, com valores acima da média. A subfração aderente comporta-se igual à subfração nucleante no teste de queda e, no teste de tamboramento, encontra-se acima da média dos demais minérios. A melhor resistência ao tamboramento da subfração aderente deve-se à presença de sílica nessas subfrações, que é muito alta; esse elemento auxilia na formação dos silicatos ferritos (BENTES et al., 1984).

As características metalúrgicas de RDI indicam que as subfrações nucleantes e intermediárias apresentam valores acima da média dos demais minérios, isso demonstra que têm comportamentos ruins. Enquanto que a subfração

aderente tem um excelente comportamento com um dos menores valores. A redutibilidade desse minério está entre os mais redutores nas suas três subfrações.

Nos ensaios de amolecimento e fusão, esse minério apresenta diferentes comportamentos nas temperaturas medidas das suas três subfrações. A subfração nucleante tem uma das menores temperaturas de amolecimento e sinterização, e a de fusão é intermediária entre os demais minérios dessa subfração. Na subfração aderente, a temperatura de amolecimento é intermediária e as de sinterização e fusão são maiores que nos demais minérios. E na subfração intermediária, as temperaturas de amolecimento e sinterização são intermediárias; a de fusão é menor que nos demais minérios.

O comportamento diferenciado dessas subfrações nos ensaios de amolecimento e fusão pode ser explicado pela sua mineralogia e pela sua participação na mistura, que afeta mais ou menos cada nível de queima. As menores temperaturas de amolecimento e sinterização apresentadas pela subfração nucleante, (nas demais são intermediárias), deve-se à maior quantidade de minerais hidratados presentes, sendo mais sensível devido à sua maior participação na mistura. A maior temperatura de fusão encontrada na subfração aderente, pode ser devido à maior quantidade de coque na mistura associada à presença de Mg. A temperatura de sinterização, nas subfrações aderentes e intermediárias é maior, provavelmente, devido à quantidade e granulometria do coque e à associação com a presença da Mg.

Esse minério apresenta diferentes comportamentos das subfrações estudadas para a vazão de ar e temperatura dos gases nas caixas de ar. Na subfração nucleante a vazão de ar é maior desde o início do aquecimento, conforme pode ser visto pelo gráfico da FIGURA 01 (ANEXO III), no entanto a sua temperatura é uma das menores e o resfriamento inicia num tempo menor.

Na subfração aderente, esse minério apresenta a curva da vazão de ar e da temperatura dos gases, medida com comportamentos semelhantes ao minério blendado; no entanto, com o início do resfriamento anterior ao do minério blendado. A vazão de ar e temperatura dos gases da subfração intermediária apresenta comportamentos semelhantes; a vazão de ar dessa subfração é maior e ocorre nos momentos finais de sinterização, a temperatura dos gases, antes do resfriamento, também é maior.

IX.5.5 – MINÉRIO GI 0137

O minério GI 0137 é um minério composto basicamente por hematita com baixo grau de deformação. Os cristais de hematita são pequenos de contatos interdigitados a irregulares, indicando um baixo grau de cristalinidade. Os Pr presentes são pequenos e dispersos, sem uma orientação definida.

As partículas primárias nucleantes desse minério apresentam uma ligeira alongação com tendência a contornos mais arredondados. A sua superfície de contorno mostra uma rugosidade fina, com reentrâncias maiores e profundas geradas pelos Pr presentes nessas partículas primárias. A dispersão dessas reentrâncias maiores, permite uma deposição das partículas mais finas de forma regular sobre a sua superfície. No entanto, as micropelotas geradas por essas partículas primárias indicam crescimento significativo.

As partículas mais finas têm a mesma proporção de cristais isolados e agregados, devido à granulação muito fina dos cristais de minerais; os cristais isolados presentes são muito pequenos. A subfração aderente desse minério não mostra um bom rendimento no processo de microaglomeração.

A química desse minério reflete a sua mineralogia, apresenta pouca quantidade de compostos indesejáveis, apenas a sílica aumenta em quantidade na subfração mais fina, mas não é problemático, visto que a sílica nessa subfração auxilia na formação do líquido durante o processo de sinterização (PIMENTA et al., 1999).

O processo de microaglomeração mostra um bom resultado de crescimento das micropelotas da subfração nucleante desse minério; em contrapartida, nas subfrações mais finas o seu resultado encontra-se entre os piores. Esse resultado satisfatório da subfração nucleante deve-se à porosidade das partículas primárias, gerando reentrâncias que permitem a aderência das partículas mais finas, ocasionando o seu crescimento. No caso da subfração

intermediária a porosidade não é tão presente, não permitindo a aderência das partículas mais finas e nem aderiram às partículas primárias nucleantes, daí o seu baixo desempenho. Enquanto que, na subfração aderente, os cristais isolados associados às pequenas partículas primárias presentes não apresentaram capacidade de aderir às partículas primárias nucleantes, ou por desagregarem ou por serem muito finos, não formando uma camada com resistência suficiente para se manterem aderidos.

Esse minério, juntamente com o minério GI 0358, são os que utilizaram menores quantidades de coque na mistura, na subfração nucleante e intermediária. E na subfração aderente utilizou quantidades intermediárias.

Os finos de retorno, gerados pelos níveis de queima desse minério, mostram que apenas a sua subfração nucleante apresenta quantidades menores dentro da mesma subfração, enquanto que, as suas subfrações intermediárias e aderentes apresentam as maiores quantidades. Isso indica que o sinter, gerado da subfração nucleante desse minério, é resistente ao manuseio e, nas demais, pouco resistentes.

A produtividade da subfração nucleante é a maior dessa subfração, enquanto que na subfração aderente, a produtividade está abaixo da média dessa subfração. Esses índices de produtividade apresentam correlações positivas com o comportamento dos finos de retorno das respectivas subfrações. A subfração intermediária tem a segunda mais alta produtividade, não mostra correlação alguma com os finos de retorno dessa subfração.

Apesar do nível de queima da subfração nucleante desse minério apresentar finos de retorno entre os menores dessa subfração, em termos de testes de resistência mecânica, esse minério é o que apresenta o pior comportamento, com melhor resultado no RDI, juntamente com o minério GI 0164. Os testes de resistência mecânica estão condizentes com os resultados dos finos de retorno, ou seja, também são altos. O valor de RDI na subfração aderente está entre os mais altos, no entanto a subfração intermediária está entre os mais baixos.

Os resultados de redutibilidade desse minério é um dos piores índices em cada subfração.

As temperaturas de amolecimento apresentam variações: a subfração nucleante apresenta temperatura intermediária, enquanto nas outras subfrações é a maior temperatura de sua respectiva subfração. Esse

comportamento indica que quanto menor o tamanho das partículas primárias desse minério, maior é a temperatura necessária para seu amolecimento.

A temperatura de sinterização apresenta a correlação inversa da temperatura de amolecimento, sendo maior para a subfração nucleante e menor para a subfração aderente. A variação da temperatura indica que quanto maior o tamanho das partículas maior a temperatura necessária para a sinterização.

A temperatura de fusão mostra que a subfração intermediária apresenta a maior temperatura e a subfração aderente a menor temperatura. Apesar da pequena participação da subfração intermediária, essa maior temperatura de fusão pode estar relacionada aos outros componentes da mistura, visto que, à essa temperatura, as outras fases mineralógicas presentes podem influenciar no seu aumento.

A vazão de ar das três subfrações desse minério mostra comportamentos intermediários entre os demais minérios das mesmas subfrações. Nas curvas apresentadas, observa-se que as subfrações desse minério iniciam o aumento abrupto da vazão, ao mesmo tempo, que os demais minérios, mas com curvaturas diferentes.

A temperatura dos gases medida nas caixas de ar indica que, a subfração nucleante desse minério apresenta uma das menores temperaturas dessa subfração e o seu resfriamento inicia-se antes das demais subfrações desse minério. A subfração aderente apresenta a segunda menor temperatura dessa subfração, com início de resfriamento posterior às demais subfrações desse minério. A subfração intermediária é a que apresenta a maior temperatura das subfrações desse minério.

Como pode-se ter visto, esse minério é um minério hematítico com baixo grau de cristalização. Os índices apresentados pelas diferentes subfrações desse minério não mostram nenhum destaque, encontrando-se sempre associado aos índices intermediários. A exceção fica com a produtividade e finos de retorno apresentados pela subfração nucleante, que são os melhores resultados dessa subfração. No entanto, pode-se concluir que esse minério não é um bom minério para ser utilizado como subfração aderente, pois gera muito finos de retorno.

IX.5.6 – MINÉRIO GI 0165

O minério GI 0165 é um minério composto basicamente de hematita e de forma localizada Mh e Mg/Mt. Os cristais de hematita são granulares a alongados, de tamanho grande, bem maior que os demais minérios. O tamanho dos cristais evidencia que o minério sofreu um intenso processo de metamorfismo, permitindo a geração desses grandes cristais. O processo deformacional não apresentou direcionamento, visto pela forma incipiente de lineações minerais apresentadas nas partículas primárias deste minério.

A porosidade deste minério é intermediária entre os minérios estudados. O tamanho dos Pr, geralmente, acompanham o tamanho dos cristais e sua distribuição é heterogênea. Nas subfrações mais finas, esse minério é o que apresenta maior quantidade de cristais isolados, como pode ser visto pela TABELA 29.

A química desse minério mostra que, apesar de ter quantidade insignificante de minerais hidratados, pode conter quantidades relativamente altas de elementos deletérios. A quantidade de SiO_2 , Al_2O_3 e PPC apresentam-se altos na suas subfrações aderentes, sendo uma ordem de grandeza maior que nas subfrações nucleantes (TABELA 01 - ANEXO I). Essa maior concentração desses elementos nas subfrações mais finas deve-se, provavelmente, pela pequena presença de minerais hidratados.

As três subfrações desse minério apresentam os melhores resultados do processo de microaglomeração. Isso, provavelmente, deve ocorrer pela forma das partículas primárias geradas nas diferentes subfrações desse minério, cujas características propiciam uma melhor nucleação.

A superfície das partículas primárias nucleantes desse minério apresentam rugosidades angulosas, cujas reentrâncias têm contornos abruptos com profundidades e concavidades grandes que permitem a deposição de partículas mais finas sobre a mesma, formando um contato resistente ao manuseio.

Nas subfrações aderentes, as partículas primárias presentes são formadas praticamente por cristais isolados, não tendo, assim, como desagregar então ao formar a camada superficial sobre a superfície da partícula primária nucleante, este à medida que vai rolando dentro do tambor, tende a ir compactando, aumentando assim o tamanho da micropelota.

Nas partículas intermediárias, utilizando princípio de LITSTER & WATERS (1990), encontramos essas partículas se comportarem como nucleantes, possibilitam a aderência das partículas mais finas e ao se comportarem como aderentes, adiram melhor às superfícies das partículas nucleantes: assim, com o tempo de tamboramento, permitem a agregação das micropelotas menores nas maiores, formando micropelotas grandes e resistentes.

O PSC desse minério é o mais alto de todos os níveis de queima na subfração nucleante; na intermediária, é o mais alto dessa subfração. Esse PSC reflete a característica do minério, formado basicamente de hematita (mais denso que os outros minerais de ferro presentes nos minérios aqui estudados), apresenta a menor porosidade dos minérios hematíticos.

O tempo de sinterização da subfração nucleante desse minério é o maior de todos os níveis de queima estudados, enquanto que o tempo da subfração aderente é um dos menores; o da subfração intermediária encontra-se num tempo médio. Apesar de apresentar um bom índice de granulação, esse maior tempo de sinterização da subfração nucleante está associado ao tempo de redução do minério que é menor, como poderá ser visto pelo índice de redutibilidade desse minério. O menor tempo de sinterização da subfração aderente deve-se provavelmente, ao seu bom índice de granulação, permitindo uma boa permeabilidade do leito de sinterização.

O coque utilizado na realização dos três níveis de queima desse minério é intermediário.

Os finos de retorno total e < 5mm desse minério são os menores nas subfrações nucleantes e aderentes; enquanto que na subfração intermediária encontra-se entre os maiores.

A produtividade, apresentada pela subfração aderente desse minério, é a maior de todos os níveis de queima e a das subfrações nucleantes e intermediárias apresenta valores intermediários. Essa maior produtividade deve

estar associada ao bom índice de granulação e também à pequena contribuição dos minerais hidratados.

Os testes de resistências mecânicas do sinter mostram que a subfração nucleante tem resultados acima da média; na subfração aderente, o resultado de teste de queda é ruim e o de tamboramento acima da média. A subfração intermediária apresenta resultados abaixo da média.

Os testes de RDI desse minério nas três subfrações encontram com valores altos, sendo geralmente o segundo maior valor de cada subfração estudada. Isso indica que é um minério mais frágil que os demais.

O índice de redutibilidade das subfrações desse minério demonstra que, está abaixo da média, dos demais minérios. Na subfração nucleante, é o menor da subfração; na subfração aderente, é de melhor resultado do minério, pois é o terceiro melhor resultado dessa subfração; a subfração intermediária apresenta-se como pior índice, juntamente com os minérios GI 0166 e o GI 0164.

Nos ensaios de amolecimento e fusão, observam-se variações nas temperaturas estudadas de uma fração para outra. A temperatura de amolecimento é uma das mais altas na subfração nucleante; a mais baixa nas subfrações aderente e intermediária. A temperatura de sinterização é uma das maiores nas subfrações nucleante e intermediária; na subfração aderente é intermediária. E a temperatura de fusão, também é uma das maiores nas subfrações nucleante e intermediárias; na subfração aderente, é uma das menores.

A vazão de ar desse minério apresenta comportamentos diferenciados: na subfração nucleante, é uma das menores; nas subfrações aderente e intermediária, são as maiores vazões de suas respectivas subfrações.

A temperatura dos gases nas caixas também mostra comportamentos diferenciados nas diferentes subfrações do minério GI 0165. Na subfração nucleante, a temperatura máxima é a maior de todos os minérios dessa subfração e foi a que teve o aumento de temperatura posterior aos demais minérios. Na subfração aderente, a temperatura dos gases teve início no aquecimento, antes dos demais minérios; início do resfriamento, antes dos demais minérios e junto com o minério GI 0358. Na subfração intermediária, o aumento da temperatura iniciou-se junto com os demais minérios, mas foi menor e igual aos minérios GI 0164, GI 0348 e o blendado; o início do resfriamento foi anterior ao minério GI 0348 e junto com o minério GI 0164.

Os dados apresentados acima indicam que esse minério pode ser utilizado como subfração aderente devido à produtividade, finos de retorno e redutibilidade, que foram acima da média dos demais minérios dessa subfração. No entanto, essa subfração não seria recomendada pelos baixos índices nos testes de queda e de tamboramento e também com relação ao RDI, pois o sínter gerado não tem resistência mecânica e o seu RDI é alto.

A subfração nucleante, apesar de apresentar bons índices de resistência mecânica, bem como pela produtividade e baixa quantidade de finos de retorno, apresenta baixos índices de RDI e redutibilidade.

A qualidade da subfração intermediária é sua alta produtividade, no entanto, apresenta quantidades de finos de retorno elevada, com índices intermediários de resistência à queda e ao tamboramento e índices de RDI e redutibilidade.

A composição simples do minério pode ser responsável pelos valores razoáveis dos testes de resistência e de redução apresentado pelo minério GI 0165. Apesar de mostrar bons índices no processo de sinterização, o sínter gerado é relativamente frágil, pois deve ter gerado pouco líquido para formar o bolo do sínter.

IX.5.7 – MINÉRIO GI 0164

O minério GI 0164 é um minério hematítico com alto grau de deformação. Esse minério é composto, basicamente de cristais de hematitas lamelares grandes, geralmente orientadas, sendo possível encontrar um segundo lineamento mineral incipiente, cortando a xistosidade principal do minério. Esse minério é mais poroso em comparação com os demais minérios estudados. Os Pr são grandes, acompanhando o tamanho dos cristais de hematita e podem ser encontrados dispersos dentro da matriz hematítica ou formando bandas, imprimindo

um bandamento à partícula primária do minério. Nas subfrações aderentes, a presença de cristais isolados é grande e a quantidade de agregados de minerais é extremamente pequena (TABELA 25). Algumas partículas primárias de com Mg e Mt podem ser encontrados, mas em menor quantidade que o minério GI 0165.

A química desse minério mostra que é um minério bastante puro, com pequenas quantidades de compostos deletérios. Isso, provavelmente, ocorre devido à quase inexistência de minerais hidratados que, na maioria das vezes, agregam esses compostos na sua estrutura.

Os resultados no processo de microaglomeração demonstram que a subfração nucleante desse minério é um excelente nucleador das partículas mais finas, visto pelo seu desempenho nesse processo. Enquanto que nas demais subfrações, o seu comportamento é intermediário. O bom resultado desse minério, como partícula nucleante, deve-se provavelmente ao tipo de superfície apresentada pelas suas partículas primárias, com rugosidade esparsa, formando reentrâncias angulosas e profundas de grande concavidade. O tipo de superfície facilita a deposição das partículas mais finas, possibilitando o seu crescimento com formação de camada resistente ao tamboramento.

O PSC desse minério demonstra que o grau de porosidade é um fator que influencia, pois o PSC da subfração nucleante não é o mais alto e apresenta o mesmo PSC do minério GI 0137. Na subfração aderente, o PSC desse minério é o segundo mais pesado, mais leve entretanto, que o minério GI 0137. E na subfração intermediária, é o mais alto, juntamente com o minério GI 0165.

O “coke rate” desse minério apresenta variações. Nas subfrações nucleantes e intermediárias, estão entre os valores acima da média; na subfração aderente, entre os menores valores.

A quantidade de finos de retorno, gerados pelas subfrações nucleantes e aderentes, apresenta valores intermediários; enquanto que na subfração intermediária, é o maior valor dessa subfração.

A produtividade desse minério demonstra variações nas diferentes subfrações. Na subfração nucleante, apesar do excelente índice de microaglomeração, apresenta o segundo pior índice de produtividade; na subfração aderente, o pior índice, juntamente com o minério GI 0358; na subfração intermediária, o terceiro pior índice. Ou seja, esse minério apresenta índice de produtividade ruim, nas suas três subfrações.

Os testes de queda demonstram resultados diferenciados para as três subfrações desse minério. Na subfração nucleante, tem o segundo pior resultado, mas nas subfrações aderentes e intermediárias, os segundos melhores resultados das suas respectivas subfrações.

Nos testes de tamboramento, os resultados foram diferentes dos testes de queda. A subfração nucleante tem o segundo melhor resultado da subfração e o terceiro de todos os níveis de queima, juntamente com o minério GI 0137A; perde apenas para os minérios blendado e GI 0137N. Na subfração aderente, mostra o segundo pior resultado da subfração, melhor apenas que o minério HI 0348. A subfração intermediária apresenta o segundo melhor resultado da subfração.

Pela observação dos testes de resistência mecânica dos sínteres gerados pelas três subfrações do minério GI 0164, conclui-se que a maior quantidade de finos gerados pelos sínteres desse minério são gerados mais por processo de queda que de transporte, visto pelos seus piores resultados no primeiro tipo de teste.

Os testes de RDI demonstram que a subfração nucleante desse minério tem o melhor resultado de todos os níveis de queima estudados, enquanto que a subfração aderente tem o terceiro pior resultado da subfração e a subfração intermediária, o terceiro melhor resultado da subfração. Assim pode ser observado que esse é bom minério para ser utilizado como nucleante, pois apresenta o melhor índice de RDI.

A redutibilidade desse minério apresenta variações nas diferentes subfrações. Como subfração nucleante, tem o terceiro pior índice de redutibilidade da subfração. A subfração aderente apresenta o segundo pior índice da subfração e de todos os níveis de queima. Como subfração intermediária, apresenta o pior índice da subfração, juntamente com o minério GI 0165.

A temperatura de amolecimento desse minério apresenta a subfração nucleante com uma temperatura intermediária aos demais minérios da subfração; a subfração aderente apresenta a segunda maior temperatura de amolecimento da subfração; a subfração intermediária apresenta a menor temperatura da subfração.

A maior temperatura de amolecimento desse minério é da subfração aderente, deve ser pela dificuldade de amolecer os cristais puros de hematita. A

menor temperatura de amolecimento, obtida pela subfração intermediária desse minério, deve-se à composição dos outros componentes da mistura.

A temperatura de sinterização desse minério, na subfração aderente, é menor da subfração; na subfração intermediária, é a maior da subfração.

A temperatura de fusão do minério é maior na subfração intermediária, menor na subfração nucleante, também é a menor de sua subfração. A diferença entre a temperatura de fusão e de sinterização é menor na subfração nucleante. Essa pequena diferença ocorre devido à mineralogia simples do minério. Assim, a temperatura necessária para sua sinterização é praticamente a temperatura necessária para a fusão da mistura, daí a pequena diferença.

A vazão de ar apresentada pelas três subfrações desse minério mostra um comportamento intermediário entre as maiores e menores vazões apresentadas pelos outros minérios. As subfrações nucleante e aderente apresentam um aumento na vazão do ar mais suave que a apresentada pela subfração intermediária, cujo aumento é mais abrupto e, no estágio final, é bem maior que as demais.

A temperatura dos gases indica que nas subfrações nucleantes e aderentes, atinge as mais altas temperaturas, com o início do resfriamento ocorrendo posteriormente aos demais minérios. Com relação à subfração intermediária, esse minério encontra-se no grupo dos minérios que apresentam temperaturas menores; o início do resfriamento ocorre juntamente com os demais minérios.

Como pode-se ver, este minério apresenta um bom comportamento de microaglomeração como subfração nucleante, com índices intermediários nos fins de retorno, testes de queda e redutibilidade; com índices acima da média nos testes de tamboramento e RDI; abaixo da média, no índice de redutibilidade e na produtividade. Observa-se que, apesar do seu comportamento de microaglomeração ser adequado; a sua produtividade é baixa, indicando que essas micropelotas maiores podem ter sido deformadas pelo peso da carga, levando à diminuição da permeabilidade do leito e, conseqüentemente, à produtividade (HINKLEY et al., 1994). As demais subfrações, aderentes e intermediárias, deste minério apresentam comportamentos intermediários

IX.6 – Caracterização Geometalúrgica

IX.6.1 – ASPECTOS GERAIS

O estudo mineralógico e textural do minério de ferro são importantes, visto que muitas das características das partículas primárias do minério podem ser relacionadas com as características internas observadas. Isso poderá ajudar na interpretação dos resultados do processo de sinterização.

A mineralogia encontrada nos diferentes tipos de minérios é indicativa da mineralogia original do minério. A seqüência mineralógica apresentada por cada tipo de minério estudado, indica que pode apresentar ou não uma mineralogia original diferenciada, como também uma seqüência de cristalização dos minerais diferenciadas (ROSIÈRE et al., 1993a). O arranjo interno dos cristais e Pr definem também a forma das partículas primárias produzidos por cada tipo de minério (SCHNEIDER et al., 1999).

O arranjo e tamanho dos minerais influenciam no tipo de partícula primária e quantidade de cristais isolados nas partículas mais finas a serem geradas em cada minério. Minérios com baixo grau de deformação apresentam cristais pequenos e de contatos interdigitados e menor quantidade de cristais isolados nas subfrações mais finas (GI 0137, GI 0358 e HI 0348). Enquanto que, os de alto grau de deformação apresentam cristais grandes e contatos mais retilíneos

e maior quantidade de cristais isolados nas subfrações mais finas (GI 0164 e GI 0165).

A forma das partículas primárias pode ser definida pelo grau de arredondamento, tipo de superfície de contorno e pelo grau de alongação, que são intimamente associados ao arranjo e tamanho dos minerais, grau de porosidade e a forma de distribuição dos minerais e Pr nessas partículas primárias. Esses fatos podem ser, facilmente observados nas partículas primárias bandadas, onde as bandas mais porosas, geralmente, são zonas de fraquezas, pelas quais as partículas primárias tendem a se quebrar de forma tabular.

O bandamento do minério parece ser um dos fatores que contribuem para definir o grau de alongação do minério, principalmente das subfrações nucleantes. O grau de alongação das partículas primárias dessas subfrações é mais acentuado, pois a espessura do bandamento é um dos fatores que define o tamanho das partículas primárias. Assim nas subfrações menores, o bandamento não interfere na fragmentação dessas partículas primárias, cuja interferência passa a ser o arranjo interno dos minerais de ferro presentes.

A influência do bandamento na forma das partículas primárias pode ser observada pelo minério GI 0166. Além do bandamento, a sua mineralogia é bastante diversificada; os minerais de hematitas lamelares dispersos na matriz, podem ser encontrados fortemente orientados definindo uma xistosidade ao minério. As partículas primárias desse minério refletem a sua textura e estrutura: os maiores são bastante alongados, acompanhando o bandamento, enquanto que o bandamento não interfere nas subfrações mais finas, cujas partículas primárias tendem a ser mais arredondada; a mineralogia diversificada gera uma maior quantidade de tipos de partículas primárias diferenciadas.

O estudo ótico dos diferentes tipos de minerais deve ser feito de forma sistemática para avaliar as diferentes mineralogias e texturas apresentadas. Como foi observado, a maioria dos minérios foram classificados como hematíticos, no entanto, as suas características internas são bem distintas. Apesar da hematita ser mineral dominante, ela pode ser encontrada de diversas formas: Mt, microcristalina, granular ou lamelar.

A hematita é um mineral importante, devido à sua ampla ocorrência e diversidade. É um mineral que representa a maior parte da reserva de minério de ferro; é encontrada desde sua formação original (origem sedimentar) a altamente

metamorfisada, bem como produto de Mg. Isso faz com que seja necessário um estudo mais preciso sobre o mesmo.

Cada tipo de hematita apresenta arranjo e tamanho diferenciados dos cristais, que refletem diferentes condições de cristalização; são fatores que interferem no processo de microaglomeração e, conseqüentemente, no processo de sinterização e nos testes de qualidade do sinter. O tipo de hematita e a textura dominante nas partículas primárias são determinantes para a sua forma e o seu tipo de superfície de contorno, principalmente, nas subfrações aderentes dos minérios estudados, conforme podem ser observados nas FIGURAS 68 e 69.

Os outros minerais são importantes também, pois sua presença pode auxiliar ou prejudicar o processo metalúrgico; isso faz com que seja necessário o seu reconhecimento e sua forma de associação.

A transformação da Mg para hematita durante o processo de sinterização, é uma reação exotérmica, enquanto que a reação inversa é uma reação endotérmica. Portanto, a presença de Mg dentro do minério interfere no processo, apesar de não ser bem entendido, até o momento, o seu papel no processo de sinterização é importante.

A presença de Mh pode auxiliar na formação da fase fluida, responsável pela agregação das partículas primárias durante a formação do bolo de sinter. No entanto, o seu excesso pode ser responsável pela fragilidade do sinter; assim, a quantidade desse mineral deve ser bem dosada.

IX.6.2 – MINÉRIOS HEMATÍTICOS

Os minérios hematíticos *stricto sensu*, compactos ou porosos, apresentam mineralogia simples; são compostos basicamente de hematitas com diferentes graus de cristalização, como: GI 0137, GI 0164 e GI 0165. As partículas

primárias dos minérios hematíticos são compostas de hematita e Pr, mas a observação em microscópio ótico evidencia que a forma, arranjo e tamanho dos cristais destes três minérios são diferentes. Os minérios GI 0164 e GI 0165, apesar de serem considerados hematíticos, apresentam partículas primárias dispersas de composição magnetítica/martítica de origem tardia.

As análises químicas dos minérios hematíticos indicam baixos teores de elementos ou compostos deletérios; apenas o minério GI 0165 apresenta quantidades um pouco maiores de PPC e Al_2O_3 , mas esses minérios podem ser colocados num mesmo grupo. Esses teores maiores de PPC e Al_2O_3 do minério GI 0165 podem ser pela presença das partículas primárias magnetítico/martíticos e esses apresentarem maior grau de hidratação.

O minério GI 0137, de baixo grau de metamorfismo, produz partículas primárias arredondadas de superfície rugosa. Essa superfície é formada por pequenas reentrâncias de curvatura pequena e pouco profunda, com reentrâncias maiores e dispersas, formadas por Pr maiores aflorantes na superfície da partícula primária. Esse tipo de minério mostra um resultado intermediário nos processos de microaglomeração.

No processo de sinterização, o minério GI 0137 é o minério que apresenta a melhor produtividade da subfração nucleante, isso mostra que é um bom minério a ser utilizado como subfração nucleante, quando for necessário aumentar a produtividade de uma mistura. As demais subfrações apresentam resultados intermediários.

Os testes de qualidade do sinter, gerado pelo minério GI 0137 confirma que a sua subfração nucleante apresenta o melhor índice dessa subfração de todos os minérios. Apenas a redutibilidade não apresenta o melhor resultado, com resultado abaixo da média; no entanto, a sua subfração intermediária possui o melhor índice de todos os níveis de queimas estudados, juntamente com o minério HI 0348N.

O minério GI 0165 é formado por cristais grandes de Hr e HI (menor quantidade). Esse tipo de minério é formado em ambientes de metamorfismo alto, que permitiu a cristalização de grandes cristais de hematitas, que tiveram tempo e espaço para sua cristalização. Este minério é o que apresenta o menor grau de porosidade dos minérios hematíticos, mas apresenta um alto grau de liberação

cristalina onde, nas subfrações mais finas, quase não se encontra agregados de minerais.

As partículas primárias geradas pelo minério GI 0165, mostram rugosidades grosseiras, formando reentrâncias profundas de concavidade aberta e bem distribuída na superfície das partículas primárias maiores. As subfrações mais finas apresentam cristais isolados arredondados de superfície irregular a ligeiramente reto. Os resultados do processo de microaglomeração mostram que as três subfrações estudadas deste minério apresentam bons índices de crescimento e nucleação. Esse bom comportamento no processo de nucleação está associado ao tipo de partícula primária gerada por esse tipo de minério.

Apesar do bom índice de crescimento da subfração nucleante do minério GI 0165, esse não apresenta uma boa produtividade. Isso deve-se, provavelmente, à deformação das micropelotas geradas durante o processo de sinterização (HINKLEY et al., 1994). As produtividades das subfrações aderentes e intermediárias são os melhores resultados de suas respectivas subfrações.

Os testes de qualidade mostram que o minério GI 0165 apresenta um resultado intermediário para as três subfrações. Apenas o seu RDI apresenta valores mais altos dos minérios hematíticos, que deve estar associado ao seu teor de Al_2O_3 (PIMENTA et al., 1999).

O minério GI 0164 é o que apresenta maior grau de metamorfismo e deformação dos minérios estudados. Os seus cristais de hematita são grandes, alongados e encontram-se orientados, definindo uma forte xistosidade ao minério. O grau de porosidade desse minério é alto. As partículas primárias maiores apresentam superfícies lisas, cortadas por reentrâncias profundas de bordas angulares e bem distribuídas, praticamente não têm partículas primárias mais finas aderidas à sua superfície. As partículas primárias das subfrações mais finas apresentam superfície de contorno reta, geralmente, alongadas e são representadas basicamente por cristais isolados.

No processo de microaglomeração, a subfração nucleante do minério GI 0164 apresenta o maior crescimento da mesma subfração; as demais subfrações, o terceiro melhor índice, de sua respectiva subfração. Esse bom comportamento da subfração nucleante deve-se às características acima citadas.

Em termos de produtividade e finos de retorno, o minério GI 0164 apresenta comportamentos intermediários nas subfrações nucleantes e

intermediárias. Juntamente com o minério GI 0358A, a sua subfração aderente apresenta a menor produtividade de todos os níveis de queima estudados.

Os índices de qualidade dos sinteres, gerados pelas subfrações do minério GI 0164, apresentam índices intermediários, com destaque à baixa redutibilidade da subfração aderente que é a mais baixa de todos níveis de queima juntamente com o minério GI 0358A.

A vazão de ar dos minérios hematíticos demonstra que são muito semelhantes, com exceção da subfração aderente do minério GI 0165, que é maior que os outros minérios hematíticos.

A temperatura dos gases na caixa de ar dos minérios hematíticos, mostra que o minério GI 0164 tem comportamento mais diferenciado nas subfrações aderentes e intermediárias. O processo de aquecimento dos níveis de queimas dessas subfrações do minério citado ocorre após os demais níveis de queima; o processo de resfriamento também inicia, posteriormente, na subfração aderente. A subfração intermediária do minério GI 0164 atinge a menor temperatura dos demais minérios hematíticos. Na subfração aderente, o minério GI 0165 inicia tanto o processo de aquecimento quanto de resfriamento, posteriormente; no entanto, é o que atinge a temperatura mais alta dessa subfração.

IX.6.3 – MINÉRIOS HEMATÍTICOS HIDRATADOS

Os minérios com algum grau de hidratação, apresentam comportamentos bastante distintos ao serem comparados com aqueles dos minérios, essencialmente hematíticos.

A presença de diferentes gerações de Mh traz algumas implicações no processo de sinterização. Pois esse mineral pode ocorrer com variações morfológicas, texturais e composicionais (SANTOS & BRANDÃO, 2003);

geralmente, associadas às impurezas presentes nos minérios, como: Al_2O_3 ; P, MnO, CaO, OH etc. (SANTOS & BRANDÃO, 2003; COELHO et al., 1999; GOLDRING & FRAY, 1989); também contribui para o aumento da quantidade de partículas mais finas nos concentrados finais (SANTOS & BRANDÃO, 2003).

Os minérios, com algum grau de hidratação, geralmente, são menos porosos e apresentam menor grau de liberação cristalina, ou seja, têm menos cristais isolados nas suas subfrações mais finas. Além disso, os teores de elementos deletérios são maiores que os minérios hematíticos. As impurezas químicas encontradas, em maiores quantidades, nos minérios são: GI 0358 de SiO_2 , HI 0348 de Al_2O_3 , MnO e PPC; e o GI 0166 de Al_2O_3 , SiO_2 , PPC e P_2O_5 . As presenças desses elementos influenciam nos resultados do processo de sinterização e principalmente, na qualidade dos sínteres gerados.

O minério HI 0348 é composto predominantemente de Hm, que forma a matriz, cortada por porções granulares de cristais maiores de Hr e/ou HI e Pr e também fraturas preenchidas ou não por cristais de Hr e HI maiores. Esse minério apresenta bandamento localizado, com bandas mais porosas e compactas; raramente, tem intercalação de bandas mais grosseiras e microcristalinas.

As partículas primárias, geradas pelo minério HI 0348m são granulares e nas subfrações mais finas, observam-se agregados microcristalinos, cristais grandes e cristais menores isolados. A superfície de contorno dessas partículas primárias apresenta rugosidade fina sem grandes reentrâncias, com muito material fino sobre a mesma.

Os resultados de microaglomeração das três subfrações estudadas do minério HI 0348 mostram que estão entre os piores minérios, com baixo grau de crescimento e nucleação. Esse comportamento ruim deve-se ao tipo de superfície apresentada nas partículas primárias maiores; a profundidade e concavidade das reentrâncias são pequenas, associadas ao material fino encontrado sobre a sua superfície, que pode não permitir boa aderência das subfrações mais finas; enquanto que as subfrações mais finas são compostas na sua maior parte por agregados de cristais muito finos e cristais isolados de diversos tamanhos, fazendo com que seja necessário maior tempo de nucleação.

Os índices de produtividade do minério HI 0348 varia de muito boa, na sua subfração aderente, a pior da subfração na intermediária, no entanto, tem alta geração de finos de retorno.

Os testes de qualidade do sinteres do minério HI 0348 mostram resultados medianos. A subfração intermediária tem o pior resultado de todos os níveis de queima. Os índices de RDI das subfrações desse minério são altos, provavelmente, pela alta quantidade de Al_2O_3 presentes (PIMENTA et al., 1999). Em contrapartida, os testes de redutibilidade mostram os melhores índices em todas subfrações. Isso indica que seria um bom minério a ser utilizado para aumentar a redutibilidade da mistura.

O minério GI 0166 é o que apresenta maior variação mineralógica, com diferentes gerações de hematitas e minerais hidratados. A presença dessa variação mineralógica influencia nos resultados dos testes de microaglomeração, sinterização e testes de qualidade. A variação mineralógica é refletida nos tipos de agregados e cristais isolados, presentes nas subfrações mais finas. Esses pequenos agregados, geralmente, são formados por minerais de hematita, Mg e Mh; enquanto que os minerais isolados são formados, geralmente, de cristais de hematitas lamelares.

O Mh presente no minério GI 0166 é encontrado como produto da Mg, hematita ou outro Mh. O Mh pode estar contornando os outros cristais de minerais presentes, envolvendo-os ou formando uma matriz, ou seja, a ocorrência do Mh é diversificada.

O bandamento apresentado pelo minério GI 0166 é responsável pela forma das partículas primárias maiores, que são bastante alongadas em relação às partículas primárias menores que são granulares.

O comportamento das três subfrações do minério GI 0166, no processo de microaglomeração, mostra diferenças. O resultado da subfração nucleante é ruim; em contrapartida, com subfrações aderentes e intermediárias apresenta os melhores resultados de suas respectivas subfrações. Esses resultados estão associados à presença de material argiloso dado pelo Mh, que nessas subfrações mais finas gera partículas mais finas (SANTOS & BRANDÃO, 2003). O material mais fino presente auxilia na geração de micropelotas mais compactas, coesivas e resistentes à compressão (ABOUZEID & SEDDIK, 1981), não deformando durante o processo de sinterização.

Os índices de produtividade nas três subfrações do minério GI 0166 ficam com o terceiro melhor resultado, indicando que apesar do grande crescimento e resistência das micropelotas, dadas pela presença de finos de Mh, não

apresentaram melhores produtividades. Isso porque, a presença maior de finos aliados ao maior grau de umidade pode ter permitido a deformação das micropelotas geradas, diminuindo, assim, a permeabilidade do leito e, conseqüentemente, a produtividade.

Os testes mecânicos do minério GI 0166 estão entre os mais baixos, indicando que os sínteres gerados são frágeis, mesmo com a maior adição de coque.

Os testes de RDI do minério GI 0166 mostram diferentes resultados, com destaque à subfração aderente, que tem o melhor resultado da subfração, sendo o segundo melhor de todos os níveis de queima, juntamente com o GI 0137N. Esse resultado, provavelmente, deve-se à presença de SiO_2 nessas subfrações. A presença de SiO_2 facilita a formação de silicatos de ferro, que auxilia na agregação do bolo de sinter, não deixando degradar-se facilmente.

Os índices de redutibilidade apresentados pelas três subfrações do minério GI 0166 estão acima da média dos demais níveis de queima.

O minério GI 0166 pode ser utilizado para elevar o índice de microaglomeração das subfrações aderentes e também abaixar os valores de RDI, ao ser adicionado na mesma subfração.

O minério GI 0358 é um minério hematítico, composto de diferentes gerações de hematitas, predominando a Hr, com resquícios de Mg e Mn associados, encontrados de forma dispersa e porosidade intermediária. A granulometria média desse mineral é dada pelos cristais de hematitas e Mts granulares de contatos interdigitados a irregulares.

A forma das partículas primárias do minério GI 0358 é granular; sua superfície apresenta uma rugosidade fina com partículas menores sobre a mesma. Nas subfrações mais finas, a presença de agregados de minerais é muito maior que nos demais minérios, sendo apenas um pouco menor que os cristais isolados de minerais, estes são bastante pequenos.

Os resultados do processo de microaglomeração do minério GI 0358 ficam abaixo da média nas três subfrações estudadas, indicando que a superfície das suas partículas primárias não permite uma boa aderência e nem adere em outro tipo de superfície.

Os índices de produtividade do minério GI 0358 são os piores nas subfrações nucleantes e aderentes, o segundo pior da subfração intermediária. Esse comportamento ruim pode ser reflexo do resultado do processo de microaglomeração.

Os testes de resistência mecânica do sinter gerado pelas subfrações do minério GI 0358, mostram que a subfração aderente desse minério tem o melhor resultado e o segundo melhor resultado nos índices de RDI da subfração. Nas demais subfrações, os resultados não são satisfatórios.

Em relação aos índices de redutibilidade, a subfração aderente apresenta o melhor resultado da subfração; na subfração nucleante, o seu índice é acima da média; na subfração intermediária, encontra-se abaixo da média, dos demais minérios, das respectivas subfrações.

O minério GI 0358 tem seu comportamento ruim no processo de microaglomeração; a sua subfração aderente poderia ser utilizada para aumentar a redutibilidade e diminuir o RDI na mistura de minérios a sinterizar.

Os minérios, com algum grau de hidratação, têm comportamentos bastante diferenciados nos dados de vazão de ar e temperatura dos gases.

A vazão de ar do minério HI 0348 apresenta valores maiores que os demais minérios nas subfrações nucleantes (menos o minério GI 0166) e aderentes; a temperatura dos gases dessas subfrações indica que o início do aquecimento e resfriamento dos gases é anterior aos demais minérios e atinge o ponto máximo numa menor temperatura.

A vazão de ar do minério GI 0166 apresenta-se bem maior na subfração nucleante e ligeiramente maior na subfração intermediária; com relação à temperatura dos gases, tem comportamento intermediário aos demais minerais.

E a vazão de ar do minério GI 0358 é a menor em todas suas subfrações; a temperatura dos gases no entanto, apresenta variações no seu comportamento.

Assim, observa-se que os minérios com as mesmas características mineralógicas mostram comportamentos diferenciados, cujas diferenças podem estar associadas a outros critérios, tais como: graus de cristalização, arranjo e tamanho dos cristais, tipos de superfícies de partículas primárias, grau de porosidade do minério.

IX.6.4 – INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Os dados apresentados acima indicam que determinados tipos de minérios, apesar de terem bons resultados no processo de microaglomeração, seus resultados de sinterização e testes de qualidade do sínter gerado não são bons, ou vice-versa.

No presente estudo, nenhum minério apresentou melhores índices em todos os processos e testes realizados. Observa-se que alguns minérios são melhores quando utilizados como subfração aderente, intermediários e/ou nucleante.

A composição de uma mistura ideal seria com minérios que tiveram os melhores rendimentos, com maior crescimento das micropelotas durante o processo de microaglomeração; melhores resultados de produtividade do processo de sinterização; melhores índices dos testes de qualidade do sínter.

A composição dessa mistura, utilizando os dados obtidos seria a especificada a seguir. No entanto, essa é uma sugestão de mistura, com vistas aos resultados obtidos pelos minérios individuais, sendo uma mistura empírica, não teria, necessariamente, bons resultados reais. O que poderia ser testado posteriormente.

A subfração nucleante seria composta dos minérios hematíticos, pois apresentam alto poder de aglomeração, devido ao tipo de superfície apresentada pelas suas partículas primárias; grau de porosidade maior que auxilia na reatividade do minério (DAWSON, 1993; CAPOLARI et al., 1998): são minérios mais resistentes. Para auxiliar no aumento da redutibilidade, poderia utilizar uma certa proporção do minério HI 0348.

A subfração intermediária seria composta pelos minérios GI 0165, GI 0166 e GI 0137; em menores quantidades, pelos minérios GI 0358, HI 0348 e GI 0164. Os três primeiros minérios auxiliariam nos índices de crescimento das micropelotas e na maior produtividade dessa subfração. O minério GI 0166 auxiliaria na menor geração de finos de retorno e no aumento da resistência ao tamboramento e diminuição do RDI. O minério GI 0137 auxiliaria nos índices de tamboramento, RDI e redutibilidade. Esses dois minérios contrabalançariam o minério GI 0165, que apresenta desempenho ruim nos índices de qualidade do sinter gerado.

A utilização de menores quantidades dos outros minérios, nessa subfração intermediária, seria para melhorar alguns índices, como o GI 0358, que melhoraria os testes de queda, o HI 0348 auxiliaria nos índices de redutibilidade. A introdução do minério GI 0164 auxiliaria no aumento da resistência mecânica e RDI. Esses três minérios, no entanto, prejudicariam outros índices, por isso as suas participações deverão ser contrabalançadas para compor essa subfração.

A composição ideal da subfração intermediária deveria conter os seguintes minérios: GI 0166, GI 0165 e GI 0137, os demais minérios em quantidades bem menores. O minério GI 0166 deve contribuir com maior quantidade, pois apresenta bons resultados desde o processo de microaglomeração, sinterização e nos testes de qualidade do sinter. Os minérios GI 0165 e GI 0137 seriam utilizados de forma complementar, principalmente o GI 0137 para melhorar os índices de qualidade do sinter; a participação do minério GI 0165 seria para aumentar os valores da produtividade; como prejudica no RDI, deve participar em menor quantidade.

Os minérios a comporem a subfração aderente seriam o minério GI 0166, GI 0165, em menor quantidade o minério HI 0348. Pois são os minérios que têm os maiores índices de produtividade; os dois primeiros minérios ainda apresentam as menores quantidades de finos de retorno. Os minérios GI 0358 e GI 0137 poderiam ser adicionados para aumentar a resistência mecânica; além disso, o minério GI 0358 auxilia também para melhorar os índices de RDI e redutibilidade dessa subfração. Essa adição do minério GI 0358, na mistura dessa subfração, deve ser feita de forma a melhorar as qualidades citadas, pois sua quantidade pode comprometer a produtividade, visto que é a menor de todos os níveis de queima.

Outros fatores devem ser observados para otimização do processo de sinterização, que podem ser operacionais, como o caso da melhoria da

produtividade, que pode ser obtida através do carregamento da matéria-prima na máquina de sinterização (YOSHIDA et al., 1996).

A utilização de minérios, que possuem sílica nas subfrações mais finas, aumenta a resistência do sinter gerada, pela formação dos silicatos ferritos durante o processo de sinterização, pois auxiliam na formação da fase líquida (BENTES et al., 1994; MOURÃO et al., 1996; PIMENTA et al., 1999).

A presença de Mg na mistura de minérios tem mostrado que, nos sínteres heterogêneos, as ligações de silicatos e ferritos de cálcio podem ser produzidos pela reação exotérmica, durante o processo de oxidação da Mg. Esse processo de oxidação permite a diminuição no consumo de coque, diminuindo os custos de produção do sinter, mas deve ser observado o balanço de massa da mistura, visto que o teor de FeO pode afetar o desempenho de sinterização (LOO, 1998).

Os principais minerais que influenciam nas propriedades do sinter são a hematita e a Mg, devido às suas concentrações nos minérios, cujas quantidades são complementares e variam em função da quantidade de combustível adicionado na mistura a sinterizar. A quantidade de coque é responsável pela criação de ambiente redutor ou oxidante, gerando Mg ou hematita, respectivamente.

Outro ponto importante é com relação à presença da Mt, a hematita na estrutura cristalina da Mg. É um produto intermediário entre esses dois minerais. A presença da Mt, no caso do minério GI 0358, pode ser responsável pela menor vazão de ar durante o processo de sinterização, também por atingir a temperatura máxima posterior aos demais minérios nas subfrações nucleantes e aderentes.

Nesse estudo, vimos que para obter um sinter ideal deve-se misturar minérios que apresentem os melhores resultados dos processos de microaglomeração, sinterização e nos testes de qualidade do sinter. E também, a introdução de minérios que apresentem quantidades de sílica e Mg, pois melhoram ou auxiliam na qualidade do sinter produzido. Um minério que apresente melhores índices em todos os quesitos, não foi encontrado. Apesar de ser observado que alguns minérios melhoram uma característica ou outra, a mistura ideal não foi sinterizada.

A sinterização da mistura ideal, com a proporção adequada de cada minério nas suas respectivas subfrações seria bastante interessante. Através do

seu resultado, poderia ser observado se as características benéficas dos diferentes minérios, ao serem misturadas, melhoram ou não o sinter resultante.

Além das características intrínsecas dos minérios e sua correlação com os processos de microaglomeração, sinterização e os testes de qualidade do sinter, deve-se buscar: minérios com propriedades que melhorem a qualidade da micropelotas úmida e seca, e distribuição adequada do tamanho das partículas primárias do *sinter feed*, pois estes são os que mais influenciam na propriedade do comportamento de boleamento e qualidade final das pelotas (ABOUZEID & SEDDIK, 1981).

Outro fator importante é com relação à proporção entre as subfrações nos minérios. A subfração nucleante é a que apresenta maior quantidade na mistura; através disso, observamos que os parâmetros que dependem da quantidade do minério são os que apresentam valores mais diferenciados, principalmente no processo de microaglomeração e o PSC que, por sua vez, influenciam na vazão do ar e na temperatura dos gases do processo de sinterização.

HINKLEY et al. (1994) observaram que os minérios com maiores densidades causam maiores deformações nas micropelotas ao serem carregados na panela, diminuindo os espaços vazios e, conseqüentemente, a permeabilidade. Assim, deve-se cuidar na obtenção da umidade ideal, visto que o crescimento acentuado das micropelotas não conduzirá à maior permeabilidade do leito.

DAWSON, 1993b, observou que as partículas primárias de formas irregulares como os finos de retorno, coque e minério goethítico deveriam comportar-se como bons nucleantes, enquanto que as partículas primárias que apresentassem superfícies suaves e regulares, como calcário e hematita compacta, não deveriam comportar-se bem. No entanto, nesse trabalho, foi observado o contrário dessa afirmação, como pode ser visto pelos resultados no Capítulo VIII.

O processo de preparação do minério também é importante ser estudado, pois dependendo do tipo de processo utilizado pode gerar diferentes tipos de partículas primárias. HOSTEN & ÖZBAY (1998) utilizaram dois sistemas de fragmentação de minério de cobre e observaram que a utilização de *particle bed breakage* produzia partículas primárias de diferentes formas com decréscimo na circularidade nos tamanhos menores, enquanto que com o *rod-mill grinding* produzia partículas mais circulares, com uma menor variação de tamanho.

A composição de uma mistura a sinterizar deve ser feita no sentido de otimizar todos os processos envolvidos, mas, como vimos, alguns minérios apresentam comportamentos positivos em determinados quesitos e ruins ou intermediários em outros. Assim, deve-se buscar uma mistura de minérios que minimize os pontos negativos e/ou melhore os positivos, buscando sempre maximizar os rendimentos do processo.

O conhecimento prévio das características intrínsecas dos minérios e suas influências nos processos subseqüentes são denominados de características geometalúrgicas. Como vimos, cada tipo de minério apresenta características benéficas nos diferentes processos estudados. É importante, que se tenha claro o comportamento de cada tipo durante estes processos, para que possa ser feita uma mistura mais adequada ao processo da usina siderúrgica em questão. Através disso, far-se-ia uma avaliação dos tipos de minérios disponíveis e a disponibilidade de utilização dos minérios não ofertados.

O conhecimento das características dos minérios, do seu desempenho durante o processo de aglomeração e sinterização e dos testes de qualidade do sinter fará com que as usinas siderúrgicas busquem minérios que melhor salientem as qualidades exigidas para o seu alto-forno.

O conhecimento prévio das características geometalúrgicas dos diferentes tipos de minérios facilitará o relacionamento entre mineradores e siderurgistas. Esse conhecimento facilitará o processo de negociação dos tipos de minérios existentes e dos que estão sendo ofertados atualmente, colocando uma referência a mais no tipo de minério, colocando quais qualidades que cada tipo de minério pode agregar à mistura a ser sinterizada.

X - CONCLUSÕES

O critério utilizado para a caracterização do minério de ferro depende do enfoque a ser utilizado; cada área que utiliza o minério de ferro como matéria-prima, caracteriza-se de acordo com as suas necessidades básicas, para sua classificação de qualidade e facilidade de operação.

Os dados obtidos mostraram alguns resultados positivos tanto do ponto de vista geológico quanto metalúrgico. As características geológicas apresentadas pelos diferentes minérios estudados influenciam no comportamento dos minérios nos processos de microaglomeração e sinterização, que por sua vez influenciam nos índices de qualidade dos sínteres obtidos.

Os minérios denominados hematíticos, na sua classificação genérica, apresentam diferentes características mineralógicas e texturais. Essas características intrínsecas, demonstradas pelos tipos de hematitas presentes são reflexos dos processos geológicos que atuaram sobre a rocha. O resultado desses processos ressalta outras características: grau de cristalização, arranjo e tamanho dos cristais, tipos de superfícies de partículas primárias e grau de porosidade do minério.

Apesar dessa “homogeneidade” mineralógica dos minérios hematíticos, esses minérios apresentam comportamentos distintos nos processos de microaglomeração, sinterização e de qualidade do sinter gerado. Então é

observado que as outras características intrínsecas influenciam nos resultados dos processos mencionados, como pode ser visto pelo comportamento diferenciado dos minérios GI 0137, GI 0164 e GI 0165.

Os minérios, com algum grau de hidratação, apresentam comportamentos bastante distintos em relação aos processos aqui estudados. Isso, provavelmente, ocorre devido à diversidade de formas de ocorrências dos minerais hidratados, como pode ser visto, pelos resultados diferentes obtidos nos processos de microaglomeração, sinterização e nos testes de qualidade.

A observação das partículas primárias dos diferentes minérios estudados mostra que as características internas dos minérios refletem na forma e no tipo de superfície das partículas primárias dos minérios, nas diferentes subfrações estudadas. Os minérios, com maior grau de cristalização, também denominados de metassomáticos, apresentam cristais de hematita maiores com faces bem retilíneas, gerando superfícies das partículas primárias mais lisas com reentrâncias profundas (GI 0164 e GI 0165). Os minérios com grau de cristalização menor, denominados de supergênicos, formam partículas primárias com superfícies de rugosidade fina com poucas reentrâncias profundas (GI 0137, GI0358 e HI 0348).

Os minérios com maior grau de cristalização apresentaram um melhor resultado durante o processo de microaglomeração nas suas subfrações nucleantes. Isso porque, sob determinada umidade, permite que as partículas mais finas (intermediárias e aderentes) fiquem aderidas na sua superfície, formando uma camada superficial. Com a rotação contínua do tambor, vai ocorrendo a compactação dessa camada superficial com agregação de novas partículas, aumentando o tamanho e a resistência a frio das micropelotas “verdes” (que não foram sinterizadas).

Os minérios hematíticos com presença de minerais hidratados (GI 0358 e HI 0348) apresentam uma taxa menor de crescimento das micropelotas, devido à diversidade de formas das suas partículas primárias, bem como aos tipos de superfícies apresentadas, fazendo com que ocorra uma “competição” entre as partículas, dificultando uma boa adesão das partículas mais finas nas suas superfícies.

O minério GI 0166 necessitou de maior quantidade de umidade, devido às suas características mineralógicas, sua porosidade e superfície específica do minério, diminuindo a sua sensibilidade à adição de água.

O comportamento das três subfrações do minério GI 0166, no processo de microaglomeração, apresenta diferenças. O resultado da subfração nucleante é ruim; provavelmente, devido ao seu tipo de superfície e forma das partículas primárias. No entanto, as subfrações aderentes e intermediárias apresentam os melhores resultados de suas respectivas subfrações, sendo o resultado da subfração aderente o melhor de todos níveis de queima. Esses bons resultados estão associados à presença de material argiloso (produto do Mh), cuja presença gera micropelotas mais compactas, coesivas e resistentes à compressão, não deformando durante o processo de sinterização.

Os minérios que apresentaram as maiores taxas de crescimento das micropelotas foram os que tiveram a participação das partículas primárias intermediárias na formação das micropelotas maiores, como no caso dos minérios GI 0164N, GI 0165I.

Os minérios hematíticos formados em condições de temperatura e pressão maiores (tipo GI 0165 e GI 0164) apresentam valores de resistência crua superiores aos de resistência seca, enquanto que os supergênicos (tipo GI 0166; GI 0358 e HI 0348) apresentam a situação inversa. O comportamento das três subfrações estudadas de cada tipo de minério apresenta resultados diferenciados. As características intrínsecas dos minérios apresentadas por cada subfração mostram que, quando o minério é utilizado como uma determinada subfração, pode melhorar o sínter obtido. Por outro lado, se o mesmo minério é utilizado em outra subfração, pode piorar o sínter obtido, nas mesmas propriedades que melhorou na outra subfração.

Assim, pode ser visto que, em cada subfração, é necessário que o minério apresente determinadas características que influenciem positivamente no sínter a ser obtido. Essas influências estão associadas às características mineralógicas ou morfológicas das partículas primárias presentes em cada subfração.

As partículas primárias de minérios que compõem a subfração nucleante devem apresentar as seguintes características:

- i) Superfície com rugosidade grosseira e/ou poucos finos aderidos na sua superfície, como os minérios GI 0137, GI 0164 e GI 0165. O minério GI 0166, apesar de apresentar superfície rugosa, possui muitos finos aderidos; além disso, a maior adição de água pode ser um dos motivos para o seu menor crescimento de suas micropelotas;
- ii) Alta resistência mecânica, por não participar da reação de sinterização, essa partícula deve ser resistente para não se desagregar durante: processo de micropelotização; o aquecimento no processo de sinterização; os testes de qualidade do sinter. Os minérios hematíticos, geralmente, são bastante resistentes;
- iii) Menor quantidade de elementos deletérios possíveis, visto que esta subfração não participará das reações de sinterização; assim os elementos contaminantes serão carregados nos altos-fornos, tornando-se difícil a sua participação na escória;
- iv) A densidade do minério deve ser controlada devido à maior participação desta subfração, visto que minérios mais densos tendem a deformar as micropelotas geradas (HINKLEY et al., 1994), diminuindo a permeabilidade do leito de sinterização (ABOUZEID & SEDDIK, 1981; HINKLEY et al., 1994).

As partículas primárias de minérios que irão compor a subfração intermediária devem apresentar as seguintes características:

- i) Boa capacidade de participar do processo de microaglomeração. Os minérios que apresentaram maior crescimento de suas micropelotas são GI 0166 e GI 0164, cujas micropelotas foram geradas com maior participação das partículas primárias dessa subfração.
- ii) Forma granular com superfície lisa e reentrâncias profundas, o que permite melhor adesão dessas partículas, como o minério GI 0165 e GI 0166. Estes foram os minérios que obtiveram o melhor comportamento de microaglomeração nessa subfração;
- iii) Mineralogia que permita participar na geração da fase líquida do processo de sinterização, aumentando assim a resistência do bolo do sinter;

- iv) A sua pequena participação na mistura pode ter feito com que as qualidades dos minérios fossem obliteradas. Apesar disso, observa-se que os diferentes tipos de minérios apresentam comportamentos diferenciados.

As partículas primárias de minérios que irão compor a subfração aderente devem apresentar as seguintes características:

- i) Capacidade de aderir em diferentes tipos de superfícies durante o processo de microaglomeração.
- ii) Forma e tamanho adequados ao tipo de mistura utilizada. Os minérios, com essas características bastante homogêneas e cristais grandes, não apresentaram boa aderência dessas partículas primárias mais finas, gerando micropelotas de menor tamanho (GI 0164A). Enquanto que, os que têm cristais médios e de forma variada apresentam bons índices de nucleação, como o minério GI 0166A (maior índice de todos os níveis de queimas) e o GI 0137A;
- iii) Presença de SiO_2 nessa fração propicia a formação dos silicatos ferritos; essa fase vítrea no bolo de sinter auxilia na resistência mecânica do sinter;
- iv) Presença de Al_2O_3 nessa fração facilita a sua exclusão do processo, visto que pode ficar na parte da escória do alto-forno; no entanto a sua quantidade deve ser dosada pois aumenta o RDI do sinter;
- v) A sua quantidade é bastante expressiva na mistura e como corresponde à parte fundida do sinter, os minérios utilizados devem apresentar características que aumentem a resistência do sinter, bem como auxiliem no processo de redução, quando colocados nos altos-fornos.

Como pode ser visto, as diferentes subfrações que compõem a mistura de minérios devem apresentar características apropriadas para assumirem a função de cada subfração na mistura. Dos minérios estudados, nenhum apresentou as características ideais em todas as subfrações. No entanto, pode ser observado que cada minério, em uma ou outra subfração pode auxiliar na melhoria de uma ou mais propriedades do sinter (TABELA 54).

Na TABELA 54, pode ser observado que os minérios nas suas diferentes subfrações obtiveram resultados diferenciados nos processos estudados. Como já mencionado, algumas características dos minérios podem ser correlacionadas com sua melhor ou pior performance nos diferentes processos.

A observação dos dados obtidos mostra que o minério GI 0137, nas suas diferentes subfrações, é o que apresenta comportamento intermediário em todos os processos estudados, geralmente, melhor que o minério blendado.

Uma observação mais geral mostra que os minérios considerados hematíticos apresentam um melhor comportamento nos processos estudados, com uma ou outra subfração, apresentando um comportamento muito ruim.

Em contrapartida, os minérios considerados supergênicos, com algum grau de hidratação, por sua vez, mostram comportamento abaixo do esperado, em maior quantidade de subfrações que os minérios hematíticos.

O comportamento diferenciado desses minérios pode ser devido à variação mineralógica e à textura apresentada pelos minérios. Os minérios hematíticos, em geral, são minérios com uma mineralogia mais simples, ou seja, não apresentam minerais diferentes, além dos tipos de hematitas presentes. Os minérios que apresentam algum grau de hidratação apresentam variedade maior de minerais, com estrutura cristalina diferenciada, apresentando também tamanhos e formas de minerais mais variáveis.

Essa diferença na variedade mineralógica, durante o processo de micraglomeração, gera partículas primárias com características distintas, cujas diferenças interferem no processo de nucleação. A eficiência do processo de sinterização está diretamente relacionada com a temperatura submetida nos diferentes minerais presentes. Assim, a correlação dos resultados acima produzirá efeitos sobre os testes de qualidade do sinter gerado por esses minérios.

Os minérios hematíticos geram partículas primárias mais homogêneas, tanto no tamanho quanto na forma, tornando o processo de nucleação menos variável. Em relação ao processo de sinterização, essa homogeneidade dos minerais presentes fará com que as temperaturas envolvidas no processo sejam mais estáveis, tornando o processo mais eficiente.

Os testes de qualidade do sinter indicam que os minérios hematíticos hidratados, quando utilizados como subfração aderente, apresentam resultados geralmente melhores que os minérios hematíticos nessa subfração. E os minérios hematíticos, quando utilizados como subfrações nucleantes, apresentam resultados melhores que os minérios com algum grau de hidratação.

Este fato ocorre devido à maior resistência dos minérios hematíticos, que, como partícula nucleante, não participa do processo de semifusão,

transmitindo a sua resistência ao bolo do sinter. Os minérios, com algum grau de hidratação, apresentam maior quantidade de elementos deletérios, que possibilita maior formação da fase líquida, agregando melhor o bolo do sinter, melhorando a qualidade sinter gerado.

Com base nos estudos e experimentos aqui realizados, conclui-se que o “sinter ideal” deve ser composto por minérios hematíticos com alto grau de recristalização, como subfração nucleante; minérios com algum grau de hidratação e contribuição de magnetita, como subfração aderente; e uma mistura de ambos para comporem a subfração intermediária.

XI – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUTROS

As recomendações para estudos posteriores seriam:

- i) Realização dos testes de granulação, sinterização da mistura considerada ideal e determinação dos índices de qualidade do sinter gerado, para comparação com os dados desse estudo. Observar se houve melhora nas propriedades estudadas; se não, quais interferências ocorreram;
- ii) Realização de sinterizações de misturas com diferentes proporções de minérios hematíticos e minérios hidratados e observação das propriedades dos sinteres gerados;
- iii) Estudo mais detalhado dos diferentes tipos de hematita e seu comportamento no processo de sinterização;
- iv) Estudo das micropelotas geradas pelas diferentes misturas utilizadas, através da observação por microscópio ótico das características internas e as relações existentes entre as diferentes subfrações utilizadas.
- v) Estudo dos diferentes tipos de sinteres gerados pelos níveis de queima realizados, observando-se as suas características internas e correlações mineralógicas apresentadas.

- vi) Escolha de dois a três tipos de minérios, com características próximas ao tipo ideal para compor a mistura, utilizando-se:
 - a) os critérios do presente trabalho;
 - b) distribuição razoável do minério geológico nas minas de ferro brasileiras (esse item é importante, pois deve-se procurar minérios geológicos de grande volume de reserva medida, para garantir homogeneidade na blendagem dos minérios metalúrgicos).

XII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUZEID, A. Z. M. & SEDDIK, A. A. Effect of iron ore properties on its balling behaviour. **Powder Technology**, v. 29, p. 233-241, 1981.

ABREU, S. F. **Recursos Minerais do Brasil**. 2^a ed., Edgard Blücher, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo e Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro (eds.), v. 2, p. 321-754, 1973

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. & BRITO NEVES, B. B. The Upper Precambrian of South América. **Bol. Inst. Geoc.** USP, v. 7, p. 45-80, 1976.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S. & GANDRA, G. T. – 2002 – Reestruturação na Siderurgia Brasileira. Disponível em:
<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/set901.pdf>> Acesso: 16 Jan 2004.

ARAÚJO FILHO, G. M.; TORRES, B. & SESHADRI, V. Caracterização de misturas para sinterização. **Metalurgia**. ABM, v. 42, n. 338, p. 19-23, 1986.

ARAÚJO, L. A. **Siderurgia**. V. I. F.T.D. S.A.(Ed.), São Paulo, 1967. 214 p.

ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N.; JOÃO, X. S. J. & COSTA, J. B. S. A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: 7^o CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, SBG, Belém, **Resumo...**, 1988, p. 392.

ASTIER J. E. — Aglomeração e redução dos minérios de ferro. **Metalurgia**. ABM, v. 21, n. 89, p. 275-294, 1965.

AZEVEDO, M. A. Sinterização a coque. In: ABM (Ed.) **Curso sobre matérias primas - Aglomeração e operação de Altos Fornos**. São Paulo: ABM, 1989 p. 59–97.

AZEVEDO, M. A. Matérias-primas para sinterização. In: USIMINAS (Ed.) **Curso do Minério de Ferro para Siderurgia**. Capítulo I. Ipatinga, Usiminas, 1991. p.1–9.

BDMG – BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS S.A. **Minas Gerais do Século XXI**. Consolidando posições na mineração / Banco do Desenvolvimento de Minas Gerais. Ed. Rona. Belo Horizonte, v 5, 159 p., 2002.

BARCELOS, J. P. & BÜCHI, J. Mina de minério de ferro de Alegria, Minas Gerais. Capítulo V. In: Schobbenhaus C. & Coelho (Eds.) **Principais depósitos minerais do Brasil: Ferro e metais da Indústria do aço** - Vol. II. Brasília, C. E. S. DNPM-CVRD, p. 29-64, 1986.

BASTOS, J. R.; MAGALHÃES, J. A. D. & HONORATO, E. P. Implantação do sistema de carregamento ISF nas sinterizações da Usiminas. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO. Ouro Preto, **Anais...**, p. 264–279, 1999.

BEISIEGEL, V. R.; BERNARDELLI, A. L.; DRUMMOND, N. F.; RUFF, A. W. & TREMAINE, J. W. Geologia e os Recursos Minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, 3, p. 215-242, 1973.

BEISIEGEL, V. R. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. In: I SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, SBG, Belém, **Anexo do Anais...**, p. 21-46, 1982.

BENTES, M. A. G.; RIBEIRO, R. & BALIZA, A. C. Aumento da produtividade pela elevação da proporção de superfinos no sinter feed. **Metalurgia & Materiais**, Maio, p. 502-511, 1994.

CAMPOS, J. A. F. Produção do aço foi recorde absoluto. **Nota de Imprensa**. Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2003.

CAPOLARI, L.; PINHEIRO, P.; OTTONI, R. & VIEIRA, M. B. H. Relação microestrutura-propriedades-desempenho de minérios de ferro na sinterização. In: XXIX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO - XIII SEMINÁRIO DE CONTROLE QUÍMICO EM METALURGIA - IX SEMINÁRIO DE CARBOQUÍMICOS, Belo Horizonte. **Anais...**, p. 701-717, 1998.

CARNEIRO, M. A.; VIDAL J. A. N. & NAJAR, F. J. Avaliação de matérias-primas e sua influência na produtividade da sinterização. **Metalurgia**. ABM, v.40, n. 321, p. 429-433, 1985.

CASTRO L. A. Minério de Ferro. In: ABM (Ed.) **Curso sobre matérias primas - Aglomeração e operação de Altos Fornos**. São Paulo, ABM, 1989. p. 5-58, 1989.

CHEMALE Jr., F.; ROSIÈRE, C. A. & ENDO, I. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um Modelo. **Pesquisas**, UFRGS, Porto Alegre, v.18, n. 2, p. 104-127, 1991.

CLOUD, P. Banded iron-formation - A gradualist's dilemma. In: Trendall, A. F. & Morris, R.C. (Eds.) **Iron Formations: Facts and Problems. Developments in Precambrian Geology**. Amsterdam, Elsevier, v. 6, p. 401–416, 1983.

COELHO, C. E. S. Depósitos de Ferro da Serra dos Carajás, Pará. Capítulo III. In: Schobbenhaus C. & Coelho (Eds.) **Principais depósitos minerais do Brasil**:

Ferro e metais da Indústria do aço - Vol. II. Brasília, C. E. S. DNPM-CVRD, p.29-64, 1986.

COELHO, L. H.; FONSECA, L.; KANEKO, K. M. & MELO, J. C. A origem do fósforo e sua localização espacial nos minérios de ferro enriquecidos supergenicamente. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, Ouro Preto, **Anais...**, p. 44-53, 1999.

COSTA, A. G. D.; ROCHA, J. M.; BONFIOLI, L. & VIEIRA, C. B. A importância do modelamento geológico-tipológico no controle de qualidade dos concentrados e pelotas de minério de ferro da Samarco Mineração S. A.. In: XXIX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO - XIII SEMINÁRIO DE CONTROLE QUÍMICO EM METALURGIA - IX SEMINÁRIO DE CARBOQUÍMICOS, **Anais...**, 545 – 553, 1998.

COSTA PEREIRA, E. A. & POOT, E. Investigação sobre o comportamento do leito de sinterização de minério de ferro durante o choque térmico. **Metalurgia**. ABM, v. 44, n. 373, p.1256-1259, 1988.

CVRD Características estruturais dos finos SECA, SECE, e ALEGRIA que compuseram pilhas de desempenho ruim e excelente na Usiminas. **Relatório Interno 1**, 22p.,1998.

DANA, J. D. & HURLBUT JR., C. S. **Manual de Mineralogia**. Ed. Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A. Rio de Janeiro, 9ª Ed. 642 p.,1984.

DAWSON, P. R. Research studies on sintering and sinter quality. In: Ironmaking and Steelmaking Proceedings, Part 2, Recent Developments in iron ore sintering. **Proceedings...**, v. 20, n. 2, p.137–143, 1993a.

DAWSON, P. R.. Granulation and strand feeding. In: Ironmaking and Steelmaking Proceedings, Part 2, Recent Developments in iron ore sintering. **Proceedings...**, v. 20, n. 2, p. 137–143,1993b.

DAWSON, P. R. The Sintering Process. In: Ironmaking and Steelmaking Proceedings, Part 4, Recent Developments in iron ore sintering. **Proceedings...**, v. 20, n.2, p. 150–159 1993c.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. **An Introduction to the Rock-forming Minerals**. Ed. Longmans Scientific & Technical. London, 2ª Ed., 696p., 1992.

DOCEGEO, Equipe – Distrito Amazônia Revisão Litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, SBG, Belém, **Anexo do Anais...**, p.11-56, 1988.

FERREIRA, G. E. **A competitividade da mineração de ferro no Brasil**. Ed. CETEM/MCT. Rio de Janeiro. 2001. 54 p.

GIBBS, A. K.; WIRTH, K. R.; HIRATA, W. K. & OLSZEWSKI JR., W. J. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16 n. 2, p. 201-211, 1986.

- GOLDRING, D.C. & FRAY, T. A. T. The characterization of iron ores for production of high quality sinter. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 16, n. 2, p. 83-89, 1989.
- GOMES, J. C. M. As Minas de Águas Claras, Mutuca e Pico e outros depósitos de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Capítulo IV. In: Schobbenhaus C. & Coelho (Eds.) **Principais depósitos minerais do Brasil: Ferro e metais da Indústria do aço - Vol. II**. Brasília, C. E. S. DNPM-CVRD, p. 29-64, 1986.
- GOODWIN, A. M. Distribution and origin of precambrian banded iron formation. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 12, n. 1-3, p. 457-462, 1982.
- GROSS, G. A. A classification of iron formations based on depositional environments. **Canadian Mineralogist**, v.18, p. 215-222, 1980.
- GROSS, G. A. Tectonic systems and the deposition of iron formation. **Precambrian Research**, v. 20, p. 171-187, 1983.
- GROSS, G. A. The metallogenetic significance of iron-formation and related stratafer rocks. **Journal Geological Society of India**, v. 28, p. 92-108, 1986.
- GROSS, G. A. Industrial and genetic models for iron ore in Iron Formations, In: Kirkham, R. V., Sinclair, W. D., Thorpe, F. I. & Duke, J. M. (eds.) - **Mineral Deposit Modeling**: Geological Association of Canada, Special Paper 40, p. 151-170, 1993.
- HASHIZUME, B. K. **Texturas e microestruturas do minério de ferro da Mina de Brucutu, NE do Sinclinal de Gandarela (MG)**. 1998. 133p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - CPMT, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.
- HERZ, N. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **U.S. Geological Survey**. Professional Paper, 641-C, 1978, 78p,.
- HINKLEY J., WATERS, A. G., O'DEA, D. & LITSTER J. D. Voidage of ferrous sinter beds: new measurement technique and dependence on feed characteristics. **International Journal of Mineral Processing**. V. 41, p. 53-69, 1994.
- HIRATA, W. K.; RIGON, J. C.; KADEKARU, K.; CORDEIRO, A. A. C. & MEIRELES, E. M. Geologia Regional da Província Mineral de Carajás. In: I SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, Belém, **Anais...**, p. 100-110, 1982 .
- HIRATA W. K. Distrito ferrífero da Serra dos Carajás. In I SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, Belém, **Anais do Anexo...**, p. 12-20, 1982.
- HOEFS, J.; MÜLLER, G. & SCHUSTER, A. K. Polymetamorphic relations in iron ores from the Iron Quadrangle Brazil: the correlation of oxygen isotope variations with deformation history. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 79, p. 241-251, 1982.
- HOSTEN Ç. & ÖZBAY C. A comparison of particle bed breakage and rod mill grinding with regard to mineral liberation and particle shape effects. **Mineral Engineering**. Technical note, v. 9, p. 871-874, 1998.

HUNDERTMARK, A. Reflexões sobre o desenvolvimento do tratamento de minério de ferro e perspectivas sobre a tecnologia do futuro. In: **I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro**, Ouro Preto, **Anais...**, p. 629 – 654, 1996.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. Produção de aço foi recorde absoluto. **Nota de Imprensa** (21.01.2003) 2003.

JAMES, H. L. Sedimentary facies of iron formation. **Economic Geology**. v. 49, n. 3, p. 235 – 293, 1954.

JAMES, H. L. & TRENDALL, A. F. Banded iron formation: Distribution in time and paleoenvironmental significance. In: Holland H.D. & Schidlowski M. (eds.) **Mineral deposits and the evolution of the biosphere**, Berlin, Springer-Verlag, 1982. p. 199-218.

JANUZZI, A.; RAMOS, M. C. D.; ROSIÈRE, C. A. & GUIMARÃES, M. L. V. A estruturação tectônica da Mina do Andrade, NE do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, Gramado, **Anais...**, p. 351-353, 1995.

JANUZZI, A. Caracterização mineralógica, uma ferramenta de trabalho na Mina do Andrade. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, Ouro Preto. **Anais...**, Ouro Preto: ABM, p. 22-32, 1999.

LADEIRA, E. A. & VIVEIROS, J. F. M. de Hipótese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base nos dados disponíveis. In: SBG-NÚCLEO MINAS GERAIS, Belo Horizonte, **Boletim**, v. 4, 12p, 1984.

LAGOEIRO, L. F. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals. **Journal of Metamorphic Geology**, v.16, p. 413-423, 1998.

LEMONS, M. R. C.; AZEVEDO, M. A.; LEITE, S. M. F. & MARÇAL, T. E. Avaliação técnica de matérias-primas para sinterização e alto-forno. **Metalurgia**. ABM, v. 35, n. 257, p. 235-242, 1978.

LEPREVOST, A. **Minerais para a Indústria**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.; Curitiba: UFPr. 1978. 173 p.

LITSTER, J. D. & WATERS, A. G. Kinetics of iron ore sinter feed granulation. **PowderTechnology**, v. 62, p.125-134, 1980.

LOO, C. E. Some progress in understanding the science of iron ore sintering. In: ICSTI/IRONMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, **Proceedings...**, p. 1299-1316, 1998.

MACAMBIRA, J. B.; RAMOS, J. F. F.; ASSIS, J. F. P.; FIGUEIRAS, A. J. M. Projeto Serra Norte. Convênio SEPLAM/DOCEGEO/UFPA e Projeto Pojuca. Convênio DNPM/DOCEGEO/UFPA. **Relatório Final**. DGL/CG/UFPA. 1990. 150 p.

MACAMBIRA, J. B. & BORGES, A. W. G. Arranjo estrutural da Formação Carajás na Jazida N4E. In: IV SIMP. GEOL. DA AMAZÔNIA. Belém. **Anais...** Belém SBG/NN. p. 331-334, 1994.

MACHADO, J. B.; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T. E. & LINDENMAYER, D. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. **Precambrian Research**, v. 49, p. 329-354, 1991.

MACHADO N. & NOCE, C. M. A evolução do setor sul do Cráton do São Francisco entre 3,1 a 0,5 Ga baseada em geocronologia U-Pb. In: SBG/BA, 2° SIMP. CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, Salvador, **Anais...**, p. 100-102, 1993.

MARSHAK, S. & ALKMIN, F. F. Proterozoic extension/contraction tectonics of the southern São Francisco Craton and adjacent regions, Minas Gerais, Brasil: A kinematic model relating Quadrilátero Ferrífero, São Francisco Basin and Cordilheira do Espinhaço. **Tectonics**, v. 8, n. 3, p. 555-571, 1989.

MEIRELES, E. M.; HIRATA, W. K.; AMARAL, E. F.; MEDEIROS FILHO, C. A. & GATO, W. C. A. Geologia das Folhas Carjás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, Estado do Pará. 37° CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Rio de Janeiro, **Anais...**, v. 5, p. 2164-2174, 1984.

MOREIRA, M. D. **Aplicações dos minerais e rochas industriais**. Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Bahia-Sergipe; Superintendência de Geologia e Recursos Minerais e Associação Baiana de Geólogos (Eds.). Salvador. 84 p. 1994.

MORRIS, R. C. A Textural and Mineralogical Study of the Relationship of Iron Ore to Banded Iron Formation in the Hammersley Iron Province of Western Australia. **Economic Geology**, v. 75, p. 184-209.1980.

MOTTA, J. P. **Economia Mineira Nacional. Política mineral e metalúrgica no Brasil**. EDURGS (Ed.), 3° Vol., Porto Alegre, 333 p. 1981.

MOURÃO, J. M.; FREITAS, G. G.; GARIGLIO, E. & KLEIN, M. S. Influência da gênese dos minérios de ferro na etapa de formação de pelotas cruas no processo de pelotização. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO., Ouro Preto. **Anais...**, p. 75–93, 1996.

NAJAR, F. Preparação de carga para sinterização e processo de sinterização. In: Curso: **Utilização do minério de ferro na siderurgia**. Capítulo III. Usiminas, Ipatinga MG. p.1-36, 1991.

OLIVEIRA, R. J. & MEDEIROS, F. T. P. Relação entre composição química e mineralógica e qualidade do sinter. In: XXIX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO, ABM, **Anais...**, p. 499-515, 1998.

PACHECO T.A.; ROCHA, G.T. E NAJAR, F.J. Adequação de mistura de minérios de ferro para produção de sinter de alta redutibilidade. In: XXVIII SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO. ABM. **Anais...**, 387-404,1997.

PEREIRA, E. A. C. Reações entre fase líquida e núcleos em sinterização de minérios de ferro. In: XXV SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO, ABM, **Anais...**, p. 347-371, 1994.

PEREIRA, O. D.; OLIVEIRA SÁ, P. C. R. DE & MARQUES, M. I. Dois ensaios críticos Política Mineral do Brasil. In: Assessoria Editorial e Divulgação Científica (ed.), **I - Recursos Minerais Nº 4**, Brasília, CNPq, 147 p, 1987.

PEREZ, F. A. & SERRA, A. R. Caracterização petrográficas e mineralógica de fundentes de sinterização. In: XXVII SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO, ABM, **Anais...**, p. 97-103, 1996.

PIMENTA, Hamilton Porto. **Estudo básico do fenômeno de degradação sob redução à baixas temperaturas em sínteres auto-fundentes**. 352p. Dissertação (Mestrado em Metalurgia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1992.

PIMENTA, H. P.; PACHECO, T. A. & CARDOSO, M. B. Caracterização tecnológica de minérios de ferro para sinterização. In: ABM, II Simpósio Brasileiro de de Minérios de Ferro, **Anais...**, p. 1-21, 1999.

PIMENTA, H. P.; HONORATO, E. P. & BASTOS, J. R. Estudo de adequação da granulometria das matérias-primas de sinterização na Usiminas. In: XXXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO, ABM, **Anais...**, p. 751-765, 2000.

PIMENTA, H. P.; CAMILO, G & MAGALHÃES, J. R. Otimização das Propriedades do Sinter a Altas Temperaturas. RPPR 1349 – **Relatório final do estudo de P & D**. Usiminas, 73p, 2002a.

PIMENTA, H. P.; COSTA, J. D. & MAGALHÃES, J. R. Avaliação do Comportamento a Altas Temperaturas da Carga Metálica dos Altos Fornos da Usiminas. In: XXXII SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, ABM, Vitória, **Anais...**, p. 65-77, 2002b.

PINHEIRO, R. V. L. & HOLDSWORTH, R. E. The structure of the Carajás N-4 Ironstone deposit and associated rocks: relationship to Archaean strike-slip tectonics and basement reactivation in the Amazon region, Brazil. **Journal of South American Earth Science**, v. 10, n. 3-4, p. 305-319.

PINHEIRO, R. V. L. & HOLDSWORTH, R. E. Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. **Journal of the Geological Society**, London, v. 154, p. 99-103, 1997b.

POVEROMO, J. J. **Iron Ores**. In: The Aise Steel Foundation. (Ed.) Ironmaking Volume – Chapter 8. Pittsburgh. p. 547 – 5XX, 1999.

QUADE H. & TAUGS, R. Textural anisotropy of banded hematite ores and its influence and reduction behaviour. In: Bunge, H.J.(Ed.), **Directional properties of materials**, p.212-222, 1988.

QUARESMA, L. F. Ferro e Aço. **Sumário Mineral**. (Ed.) DNPM – Departamento Nacional de Pesquisas Minerais. 22ª Ed. 64-67, 2002.

RAMOS, M. C. D.; ROSIÈRE, C. A. & ERNESTO, M. — Características texturais, estruturais e de anisotropia magnética dos minérios de ferro da Mina do Andrade (João Monlevade, MG). In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, Gramado, **Anais...**, p. 154-156, 1995.

RICKETTS, J. A. A short story of Ironmaking. ICSTI/ Ironmaking conference proceedings, Canadá. **Proccedings...**, p. 3-40, 1998.

RODRIGUES, E. S.; LAFON, J. M. & SCHELLER, T. Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: 37° CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, São paulo, **Boletim de resumos expandidos**, v. 2, p. 183-184, 1992.

ROSIÈRE, C. A. & CHEMALE Jr., F. Textural and structural aspects of iron ores from Iron Quadrangle, Brazil. **Source, Transport and Deposition of Metals**. Pagel & Leroy (Eds), Balkema, Rotterdam, p. 485 – 488, 1991.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F. & GUIMARÃES, M. L. V. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I: Estruturas e Recristalização. **Geonomos**, v.1, n. 1, p. 65 –84, 1993a.

ROSIÈRE, C. A.; QUADE, H.; SIEMENS, H.; CHEMALE Jr., F. & RESENDE DE SOUZA, E. M. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte II: Trama, Textura e Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. **Geonomos**, v. 4, n. 1, p. 61-75, 1993b.

ROSIÈRE, C. A.; QUADE, H.; CHEMALE JR.; F. & SIEMENS, H. As características mineralógicas, texturais e de anisotropia dos minérios de ferro como parâmetros geometalúrgicos. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO, ABM, Ouro Preto, **Anais....**, p. 163 – 179, 1996a.

ROSIÈRE, C. A.; VIEIRA, C. B. & SESHADRI, V. Caracterização microestrutural e textural de minérios de ferro para controle de processo em altos-fornos com ênfase em geometalurgia e engenharia dos materiais. In: I SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, ABM, Santos, **Anais....**, p. 175 – 189, 1996b.

ROSIÈRE, C. A., VIEIRA, C. B., SESHADRI, V., CHEMALE JR., F. - 1997 - Classificação genética de minérios de ferro - problemas e vícios - Proposta de uma classificação tipológica para indústria. In: XXVIII SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO, ABM, **Anais...**, 295-302, 1997.

ROSIÈRE, C. A.; QUADE, H.; SIEMES, H. & CHEMALE JR.; F. Fabric, texture and anisotropy of magnetic susceptibility in high-grade iron ores from the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. In: International Conference on Texture and Anisotropy of Polycrystals (Universität Clausthal), **Materials Science Forum**, p. 273-275, 1998.

ROSIÈRE, C. A., SESHADRI, V., LAGOEIRO, L. E. & VIEIRA, C. B. Geological characteristics of iron ores from Quadrilátero Ferrífero. In: 1° INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING, ABM, Belo Horizonte, **Anais...**, p. 49-55, 2001.

SATO, S., KAWAGUCHI, T., ICHIDATE, M. & YOCHINAGA, M. Melting model for iron ore sintering. **Transactions ISIJ**, v. 26, p. 282-290, 1986.

SANTIAGO, T. C.; JANNUZI, A.; BORGES, W. O. & MENDES, L. M. Caracterização físico-metalúrgica dos minérios granulados das minas de Alegria e da Serra da Piedade – Quadrilátero Ferrífero – MG. In: XXX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO, ABM, Ouro Preto, **Anais...**, p. 387-404, 1999.

SANTIAGO, T. C.; FIGUEIRA, R. M. ZAVAGLIA, G.; CASTRO, L. F. A. & TAVARES, R. P. Caracterização química e estrutural do minério de ferro – sinter feed – Avaliação técnica em sinterização piloto utilizando minérios da porção leste do Quadrilátero Ferrífero. In: XXIX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO - XIII SEMINÁRIO DE CONTROLE QUÍMICO EM METALURGIA - IX SEMINÁRIO DE CARBOQUÍMICOS, ABM, Belo Horizonte, **Anais...**, p. 199-213, 2000.

SANTOS, L. D. & BRANDÃO, P. R. G. Morphological varieties of goethite in iron ores from Minas Gerais, Brazil. **Minerals engineering**. v. 16, p.1285-1289, 2003.

SESHADRI, V. VIEIRA, C. B.; COELHO, L. H. & ROSIÈRE, C. A. Análise da influência dos atributos mineralógicos e texturais sobre a redutibilidade de granulados de minérios de ferro para altos-fornos. In: 51 CONGRESSO DA ABM, **Anais...**, p. , 1996.

SCHORSCHER, H. D. Komatiitos na estrutura “greenstone belt”, Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: 30° CONG. BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Recife, SBG, **Resumos...**, p. 292-293, 1978.

SCHNEIDER, L. C.; NEUMANN, R & NETO, A. A. Avaliação do desempenho de um circuito de moagem de minério de ferro por meio da análise de imagens digitais. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, ABM, Ouro Preto, **Anais...**, p. 383- 408, 1999.

SILVA, C. C. A concentração de minério de ferro com alto grau de hidratação. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, ABM, Ouro Preto, **Anais...**, p. 106-118, 1999.

SILVA NETO, P. P.; MUNIZ, G. L. F.; RODRIGUES, J. C. & MOREIRA, G. T. P. Evolução das técnicas de avaliação de minério de ferro para sinterização. **Metalurgia**. ABM, v. 4 n. 284, p.373-379, 1981.

SOUZA NETO, A. N.; CAPOLARI, L. & SILVA NETO, P. P. Ênfase da pesquisa de minério de ferro no centro de pesquisas da CVRD. In: XXIX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO - XIII SEMINÁRIO DE CONTROLE QUÍMICO EM METALURGIA - IX SEMINÁRIO DE CARBOQUÍMICOS, ABM, Belo Horizonte, **Anais...**, p. 681–687, 1998.

SOUZA, R. P. & BROSCH, C. D. Avaliação da superfície dos finos de minério de ferro. **Metalurgia**. ABM, v. 21, n. 89, p.307-316,1965.

SOUZA, W. T. Considerações sobre a ocorrência e produção de Minério de Ferro. In: ABM/Ouro Preto, I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO, **Anais...**, p. 619 – 627, 1996.

TAVARES, L. M. M. Efeito da microestrutura na fragmentação de minérios de ferro. In: **II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro**, ABM, Ouro Preto, **Anais...**, p.60-72, 1999.

TRENDALL, A. F. The Hammerley Basin. In: Trendall, A. F. & Morris, R.C. (Eds.), Iron Formations: Facts and Problems. **Developments in Precambrian Geology**, Elsevier, Amsterdam, v. 6, p. 69 – 129, 1993.

- VENKATARAMANA, R.; GUPTA, S. S. & KAPUR, P. C. A combined model for granule size distribution and cold bed permeability in the wet stage of iron sintering process. **International Journal of Mineral Processing**, v. 57, p. 43-58, 1999.
- VENKATARAMANA, R.; KAPUR, P. C. & GUPTA, S. S. Modelling of granulation by a two-stage auto-layering mechanism in continuous industrial drums. **Chemical Engineering Science**, v. 57, p.1685-1693, 2002.
- VERÍSSIMO, C. U. V. **Jazida de Alegria: Gênese e Tipologia dos Minérios de Ferro (Minas 3,4 e5) – Porção Ocidental**. 1999. 234 p. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Geociências/Geologia Regional (IGCE-UNESP), 1999.
- VIDAL, R.; MEUNIER, G. & POOT E. Investigations into the rational constitution of sinter blend with a view to production of high quality sinter. In: 44TH IRONMAKING CONFERENCE, AIME, **Proceedings...**, p. 181-189, 1985.
- VIEIRA, C. B.; SESHADRI, V.; PENA, E. Q. & ROSIÈRE, C. A. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: Análise crítica. In: XXIX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO - XIII SEMINÁRIO DE CONTROLE QUÍMICO EM METALURGIA - IX SEMINÁRIO DE CARBOQUÍMICOS, ABM, Belo Horizonte, **Anais...**, p. 555 – 565, 1998.
- VIEIRA, C. B.; ROSIÈRE, C. A.; SESHADRI, V.; ASSIS, P. S.; COELHO, L. H. & PENA H. Q. Geometallurgical approach for quality control of iron ores for agglomeration in iron and steel industry. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BENEFICIATION AGGLOMERATION AND ENVIRONMENT – ISBAN, Bhubaneswar, Índia, **Proceedings...**, p. 1-7, 2000.
- WALDE, D. H. G. Geologia do Ferro. In: Schobbenhaus C. & Coelho (Eds.) **Principais depósitos minerais do Brasil: Ferro e metais da Indústria do aço** - Vol. II. Brasília, C. E. S. DNPM-CVRD, p. 3-6, 1986.
- WIRTH, K. R.; GIBBS, A. K. & OLSZEWSKI JR., W. J. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará Group and Serra dos Carajás granite, Pará, Brazil. In: **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, n. 2, p. 195-200, 1986.
- XAVIER, E. M. **Relação entre o processo de redução direta e os atributos estruturais e texturais do minério de ferro da Mina da Mutuca**. 1994. 164p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1994.
- ZAVAGLIA, G. **Condicionantes geológicos do comportamento dos minérios de ferro do Depósito de Tamanduá (MG) no processo metalúrgico de redução direta**. 1995. 200p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1995.
- YOSHIDA, h.; IIDA, H.; KABUTO, S. & SUZUKI, H. Improvement of productivity of sintering plant at Nagoya works of NSC. In: IRONMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS. **Proceedings...**, p. 373-376, 1996.

HOMEPAGES PESQUISADAS:

Consulta dos minerais: Disponível em Jan/2003:

<www.webmineral.com>

Informações sobre o mercado do aço, disponível em Jul/2003

<<http://www.worldsteel.org>>

<www.uol.com.br/diariodovale/arquivo/2000/maio/31/page/fr-economia.htm>

Consulta sobre informações históricas sobre o minério de ferro e processo siderúrgico em Minas Gerais: Disponível em Maio 2003

<<http://www.asminasgerais.com.br/qf/TeCer/Industria/csbm/> - Cid Wildhafen>

Informações sobre as minerações: Disponível em Set/2003

<<http://www.ferteco.com.br/feijao.htm>>

<http://www.mbr.com.br/conheca/complexo_tamandua.asp>

<<http://www.cvrd.com.br/src/frameset.html?LIN=/port&CAP=/geral&SEC=/sitemap>>

ANEXO I

Qualidade química do Minério de Tamandua – GI0137, após a separação em faixas:

Identificação	Análise Química (%)														
	IGD	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	PPC	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	S	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO
GI0137-1		69,3	0,19	<0,02	0,31	0,29	0,06	0,19	0,02	<0,02	0,012	0,005	<0,02	<0,02	<0,005
GI0137-2		69,7	0,24	<0,02	0,32	0,23	0,06	0,10	0,02	<0,02	0,011	0,005	<0,02	<0,02	<0,005
GI0137-3		69,3	0,19	<0,02	0,39	0,24	0,10	0,16	0,03	<0,02	0,012	0,004	<0,02	<0,02	<0,005
GI0137-6		68,5	0,25	<0,02	0,61	0,32	0,36	0,38	0,05	<0,02	0,032	0,006	<0,02	<0,02	<0,005
GI0137-7		68,3	0,17	<0,02	1,06	0,55	0,51	0,65	0,08	<0,02	0,037	0,007	<0,02	<0,02	<0,005

TABELA 01 – Tabela com análises químicas das frações granulométricas do minério GI 0137.

Qualidade química do AN/PIC, GI0164, separado em faixas.

Identificação	Análise Química (%)														
	IGD	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	PPC	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	S	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO
GI0164-1		69,9	0,21	<0,02	0,11	0,16	0,02	<0,10	0,024	<0,02	0,007	0,005	<0,02	<0,02	<0,005
GI0164-2		69,4	0,35	<0,02	0,10	0,24	0,03	<0,10	0,030	<0,02	0,009	0,005	<0,02	<0,02	<0,005
GI0164-3		69,0	0,34	<0,02	0,97	0,64	0,06	0,18	0,030	<0,02	0,013	0,005	<0,02	<0,02	<0,005
GI0164-6		69,0	0,26	<0,02	0,77	0,28	0,04	<0,10	0,025	<0,02	0,015	0,005	<0,02	<0,02	<0,005
GI0164-7		69,0	0,27	<0,02	0,91	0,48	0,10	0,24	0,046	<0,02	0,012	0,006	<0,02	<0,02	<0,005

TABELA 02 – Tabela com análises químicas das frações granulométricas do minério GI 0164.

Qualidade química do minério AN/PAÇO, GI0165, separado em faixas:

Identificação	Análise Química (%)													
	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	PPC	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	S	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO
GI0165-1	70,0	0,26	0,02	0,11	0,56	0,19	0,33	0,050	0,03	0,017	0,004	< 0,02	< 0,02	< 0,005
GI0165-2	68,9	0,22	< 0,02	0,11	0,67	0,23	0,41	0,045	0,04	0,019	0,004	< 0,02	< 0,02	< 0,005
GI0165-3	68,2	0,22	< 0,02	0,19	0,68	0,32	0,45	0,050	0,05	0,027	0,005	< 0,02	< 0,02	< 0,005
GI0165-6	69,1	0,20	< 0,02	0,25	0,50	0,24	0,39	0,043	0,05	0,029	0,005	< 0,02	< 0,02	< 0,005
GI0165-7	65,6	0,20	< 0,02	1,92	2,89	0,79	1,66	0,130	0,29	0,040	0,006	< 0,02	< 0,02	< 0,005

TABELA 03 – Tabela com análises químicas das frações granulométricas do minério GI 0165.

Qualidade química do Alegria, GI0166, separado em faixas.

Identificação	Análise Química (%)													
	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	PPC	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	S	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO
GI0166-1	65,2	0,75	< 0,02	0,90	0,59	0,02	4,65	0,18	< 0,02	0,021	0,011	< 0,02	< 0,02	< 0,005
GI0166-2	65,8	0,58	< 0,02	0,86	0,44	0,03	4,10	0,14	< 0,02	0,022	0,009	< 0,02	< 0,02	< 0,005
GI0166-3	65,6	0,70	< 0,02	1,54	0,46	0,02	3,86	0,14	< 0,02	0,023	0,010	< 0,02	< 0,02	< 0,005
GI0166-6	52,0	0,34	< 0,02	21,7	0,64	0,02	3,85	0,17	0,03	0,054	0,015	< 0,02	< 0,02	< 0,005
GI0166-7	62,8	0,25	< 0,02	5,32	0,71	0,02	3,64	0,17	< 0,02	0,075	0,016	< 0,02	< 0,02	< 0,005

TABELA 04 – Tabela com análises químicas das frações granulométricas do minério GI 0166.

Qualidade química do minério Córrego do feijão (Ferteco) – GI0358, separado em faixas:

Identificação	Análise Química (%)													
	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	PPC	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	S	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO
GI0358-1	70,0	4,53	0,03	0,42	0,22	0,11	< 0,10	0,044	0,03	0,014	0,006	< 0,02	< 0,02	0,004
GI0358-2	69,0	4,32	0,02	0,51	0,23	0,24	< 0,10	0,046	0,04	0,014	0,005	< 0,02	< 0,02	0,004
GI0358-3	69,6	4,15	0,02	0,54	0,21	0,23	< 0,10	0,046	0,04	0,014	0,006	< 0,02	< 0,02	0,004
GI0358-6	69,0	1,57	0,01	0,52	0,30	0,61	0,51	0,058	0,05	0,014	0,004	< 0,02	< 0,02	0,006
GI0358-7	68,2	0,22	0,02	0,69	0,50	0,90	0,83	0,069	0,04	0,019	0,005	< 0,02	< 0,02	0,007

TABELA 05 – Tabela com análises químicas das frações granulométricas do minério GI 0358.

Qualidade química do Carajás HI0348, separado por faixas:

Identificação	Análise Química (%)													
	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	PPC	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	S	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO
HI0348-1	63,5	0,16	< 0,02	0,20	4,75	0,93	2,86	0,09	< 0,02	0,12	0,009	< 0,02	< 0,02	< 0,005
HI0348-2	67,6	0,20	< 0,02	0,21	1,49	0,52	1,03	0,05	< 0,02	0,05	0,005	< 0,02	< 0,02	< 0,005
HI0348-3	68,6	0,18	< 0,02	0,21	0,71	0,36	0,60	0,04	< 0,02	0,03	0,006	< 0,02	< 0,02	< 0,005
HI0348-6	64,8	0,24	< 0,02	0,46	3,57	0,74	2,35	0,10	< 0,02	0,25	0,009	< 0,02	< 0,02	0,005
HI0348-7	64,9	0,24	< 0,02	0,43	3,17	0,82	2,40	0,15	< 0,02	0,50	0,007	< 0,02	< 0,02	0,008

TABELA 06 – Tabela com análises químicas das frações granulométricas do minério HI 0348.

PRINCIPAIS TIPOS DE TEXTURAS DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE Fe

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

FIGURA 01 – Tipos de texturas de óxido e hidróxido de ferro e suas características principais (Modificado da CVRD, 1998).

ANEXO II

ANÁLISE MINERALÓGICA DO SINTER

NÍVEIS DE QUEIMA DO MINÉRIO BLENADO							
DATA	Nível de Queima	HEMATITA	MAGNETITA	C.FERRITAS	SILICATOS	POROS	TOTAL
08/07/02	N01A	12,58	21,46	10,48	9,84	44,62	98,98
08/07/02	N01B	19,70	28,94	8,30	8,22	32,62	97,78
09/07/02	N01C	25,00	12,95	13,16	7,06	40,73	98,90
08/07/02	N01D	4,16	31,36	15,42	10,67	36,42	98,03
08/07/02	N01E	23,76	14,26	11,57	20,26	28,04	97,89
MÉDIA	N01X	17,04	21,79	11,79	11,21	36,49	98,32

TABELA 01 – Análise mineralógica do sinter gerado pelo minério blendado.

NÍVEIS DE QUEIMA DAS SUB-FRAÇÕES NUCLEANTES							
DATA	Nível de Queima	HEMATITA	MAGNETITA	C.FERRITAS	SILICATOS	POROS	TOTAL
09/07/02	N02A	25,15	14,24	12,67	11,09	35,65	98,80
10/07/02	N02B	23,15	13,21	15,89	11,11	35,25	98,61
09/07/02	N02C	18,57	21,66	11,41	8,98	38,54	99,16
11/07/02	N02D	4,74	21,68	11,70	10,53	50,38	99,03
09/07/02	N02E	13,62	19,63	16,26	7,63	41,70	98,84
MÉDIA	N02X	17,05	18,08	13,59	9,87	40,30	98,89
09/07/02	N03A	6,64	19,20	19,75	11,18	42,03	98,80
09/07/02	N03B	7,69	24,32	13,83	11,46	41,59	98,89
09/07/02	N03C	7,05	18,42	16,98	9,88	46,43	98,76
09/07/02	N03D	6,99	19,65	19,35	11,00	41,68	98,67
10/07/02	N03E	15,38	21,15	11,44	8,01	43,10	99,08
MÉDIA	N03X	8,75	20,55	16,27	10,31	42,97	98,84
10/07/02	N04A	8,87	25,44	16,87	14,76	32,75	98,69
10/07/02	N04B	22,45	12,84	10,47	7,58	45,68	99,02
10/07/02	N04C	10,71	19,94	13,07	8,73	46,52	98,97
10/07/02	N04D	6,96	23,32	12,69	6,96	49,00	98,93
10/07/02	N04E	4,22	30,56	11,17	9,82	43,39	99,16
MÉDIA	N04X	10,64	22,42	12,85	9,57	43,47	98,95
15/07/02	N05A	15,17	23,60	17,33	9,38	33,19	98,67
11/07/02	N05B	16,32	11,20	11,68	9,41	50,46	99,07
11/07/02	N05C	12,86	17,90	11,06	8,52	48,62	98,96
11/07/02	N05D	10,24	25,08	11,03	11,29	41,26	98,90
11/07/02	N05E	15,70	24,00	10,94	8,36	40,07	99,07
MÉDIA	N05X	14,06	20,36	12,41	9,39	42,72	98,93
10/07/02	N06A	24,30	19,20	15,14	9,19	31,33	99,16
11/07/02	N06B	9,35	23,56	11,49	9,93	45,15	99,48
12/07/02	N06C	2,67	30,39	13,40	11,20	41,33	98,99
12/07/02	N06D	3,83	27,37	21,74	9,53	35,85	98,32
11/07/02	N06E	7,38	20,55	20,11	9,78	40,36	98,18
MÉDIA	N06X	9,51	24,21	16,38	9,93	38,80	98,83
12/07/02	N07A	2,51	31,28	15,29	14,80	34,07	97,95
12/07/02	N07B	13,18	20,58	17,85	11,05	35,95	98,61
12/07/02	N07C	6,42	24,85	11,56	9,42	46,43	98,68
12/07/02	N07D	10,87	22,76	11,21	11,84	42,23	98,91
15/07/02	N07E	5,71	23,60	19,26	7,64	42,63	98,84
MÉDIA	N07X	7,74	24,61	15,03	10,95	40,26	98,60

TABELA 02 – Análise mineralógica dos sinteres gerados pelas mistura de minérios na sua subfração nucleante.

NÍVEIS DE QUEIMA DAS SUB-FRAÇÕES ADERENTES							
DATA	Nível de Queima	HEMATITA	MAGNETITA	C.FERRITAS	SILICATOS	POROS	TOTAL
12/07/02	N08A	6,47	18,45	15,26	10,84	47,82	98,84
15/07/02	N08B	3,10	17,60	18,34	9,27	50,08	98,39
15/07/02	N08C	4,42	32,21	16,90	10,94	34,35	98,82
15/07/02	N08D	3,26	23,87	19,72	10,23	41,66	98,74
15/07/02	N08E	8,22	24,46	13,50	8,65	44,14	98,97
MÉDIA	N08X	5,09	23,32	16,74	9,99	43,61	98,75
15/07/02	N09A	7,73	22,58	13,92	11,58	43,13	98,94
16/07/02	N09B	21,15	22,54	9,83	8,17	37,59	99,28
16/07/02	N09C	17,72	13,99	12,01	8,91	46,44	99,07
16/07/02	N09D	10,56	21,16	17,68	9,73	39,77	98,90
16/07/02	N09E	11,78	23,81	13,05	10,03	40,26	98,93
MÉDIA	N09X	13,79	20,82	13,30	9,68	41,44	99,02
16/07/02	N10A	11,33	32,71	15,38	8,72	30,69	98,83
16/07/02	N10B	1,27	38,28	13,20	7,34	38,97	99,06
16/07/02	N10C	3,10	34,29	16,21	8,81	36,46	98,87
17/07/02	N10D	2,48	33,23	16,36	8,88	37,92	98,87
17/07/02	N10E	2,85	39,15	14,40	9,53	33,04	98,97
MÉDIA	N10X	4,21	35,53	15,11	8,66	35,42	98,92
17/07/02	N11A	15,31	22,45	12,05	12,40	36,66	98,87
17/07/02	N11B	20,54	18,65	16,75	10,07	32,61	98,62
17/07/02	N11C	22,95	19,73	10,25	10,39	35,69	99,01
17/07/02	N11D	16,75	23,05	10,26	8,29	40,68	99,03
17/07/02	N11E	6,06	27,46	19,58	10,50	35,08	98,68
MÉDIA	N11X	16,32	22,27	13,78	10,33	36,14	98,84
18/07/02	N12A	9,01	28,96	11,09	9,10	40,80	98,96
18/07/02	N12B	9,61	20,34	16,81	8,37	43,69	98,82
18/08/02	N12C	13,56	27,17	16,06	10,55	31,31	98,65
18/07/02	N12D	5,54	32,73	17,34	8,27	34,88	98,76
18/07/02	N12E	18,33	28,03	11,95	7,52	33,11	98,94
MÉDIA	N12X	11,21	27,45	14,65	8,76	36,76	98,83
18/07/02	N13A	22,60	23,55	12,99	10,59	29,17	98,90
18/07/02	N13B	6,37	25,27	17,24	10,30	39,54	98,72
19/07/02	N13C	14,16	17,18	11,86	10,37	45,53	99,10
19/07/02	N13D	13,75	25,12	15,71	8,90	35,30	98,78
19/07/02	N13E	31,43	21,81	8,78	7,21	29,76	98,99
MÉDIA	N13X	17,66	22,59	13,32	9,47	35,86	98,90

TABELA 03 – Análise mineralógica dos sínteres gerados pelas mistura de minérios na sua subfração aderente.

NÍVEIS DE QUEIMA DAS SUB-FRAÇÕES INTERMEDIÁRIOS							
DATA	Nível de Queima	HEMATITA	MAGNETITA	C.FERRITAS	SILICATOS	POROS	TOTAL
02/07/02	N14A	27,14	25,22	15,73	4,20	24,97	97,26
01/07/02	N14B	29,63	14,06	11,39	8,80	35,11	98,99
02/07/02	N14C	21,42	11,65	17,50	9,42	38,89	98,88
02/07/02	N14D	22,79	23,26	13,30	10,99	27,73	98,07
02/07/02	N14E	36,16	13,78	17,13	6,67	25,26	99,00
MÉDIA	N14X	27,43	17,59	15,01	8,02	30,39	98,44
04/07/02	N15A	5,54	26,19	14,72	7,48	45,09	99,02
04/07/02	N15B	10,04	23,88	14,63	6,91	43,48	98,94
04/07/02	N15C	10,75	10,41	23,86	7,75	45,79	98,56
04/07/02	N15D	16,52	14,99	15,79	7,16	44,39	98,85
04/07/02	N15E	18,17	20,18	12,33	6,17	42,50	99,35
MÉDIA	N15X	12,20	19,13	16,27	7,09	44,25	98,94
04/07/02	N16A	12,34	15,38	18,48	10,23	42,43	98,86
05/07/02	N16B	7,32	33,39	10,22	11,23	36,98	99,14
05/07/02	N16C	12,33	19,62	9,81	10,64	46,79	99,19
05/07/02	N16D	9,19	27,37	12,64	13,46	36,00	98,66
05/07/02	N16E	7,84	26,09	10,74	12,35	41,84	98,86
MÉDIA	N16X	9,80	24,37	12,38	11,58	40,81	98,94
02/07/02	N17A	19,94	20,97	14,64	6,87	36,65	99,07
02/07/02	N17B	23,87	20,80	9,74	6,85	37,81	99,07
02/07/02	N17C	24,02	17,08	10,47	7,73	39,65	98,95
03/07/02	N17D	21,24	13,82	21,09	5,60	37,03	98,78
03/07/02	N17E	23,51	15,99	21,45	6,58	31,13	98,66
MÉDIA	N17X	22,52	17,73	15,48	6,73	36,45	98,91
05/07/02	N18A	14,07	23,20	9,72	10,03	41,63	98,65
08/07/02	N18B	20,99	16,19	18,42	8,03	35,33	98,96
08/07/02	N18C	7,78	18,47	18,74	9,42	44,32	98,73
08/07/02	N18D	19,56	11,66	12,58	15,86	38,87	98,53
08/07/02	N18E	8,58	12,27	22,09	14,12	40,85	97,91
MÉDIA	N18X	14,20	16,36	16,31	11,49	40,20	98,56
03/07/02	N19A	10,31	27,38	17,61	10,74	32,84	98,88
03/07/02	N19B	7,82	38,51	17,71	7,55	27,44	99,03
03/07/02	N19C	7,40	27,61	21,41	6,27	36,08	98,77
03/07/02	N19D	27,89	20,03	14,40	6,91	29,27	98,50
03/07/02	N19E	14,83	27,14	16,29	6,42	34,37	99,05
MÉDIA	N19X	13,65	28,13	17,48	7,58	32,00	98,85

TABELA 04 – Análise mineralógica dos sínteres gerados pelas mistura de minérios na sua subfração intermediária.

ANEXO III

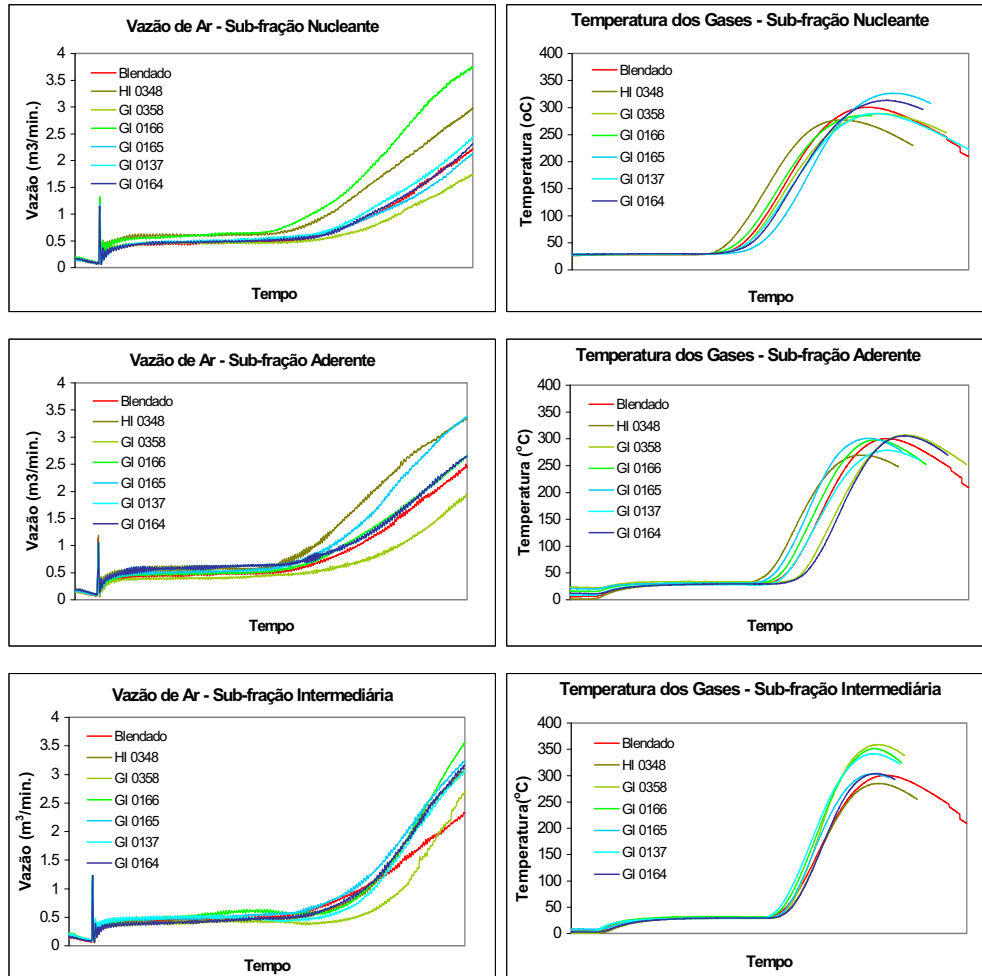


FIGURA 01 – Resultado da vazão de ar e temperatura dos gases passantes pelo leito, medidas nas caixas de vento. Os níveis de queima estão divididos por sub-frações com o minério blendado, para efeito de comparação. Linha pontilhada vermelha separa o minério blendado e as sub-frações dos minérios.

ANEXO IV

Resultados de análise química dos sinteres preparados

Sínter	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S
N01	59,8	7,34	8,79	5,08	0,97	0,060	0,97	0,69	0,08	0,010
N02	59,1	7,22	8,99	5,13	1,13	0,064	1,12	0,73	0,13	0,011
N03	59,8	7,04	9,09	5,18	0,90	0,059	1,13	0,75	0,13	0,011
N04	60,4	8,14	8,85	5,05	0,95	0,064	1,06	0,71	0,16	0,009
N05	59,8	6,72	8,57	4,98	0,97	0,060	1,10	0,68	0,13	0,009
N06	60,0	7,45	9,00	5,15	0,89	0,057	1,08	0,70	0,14	0,010
N07	60,4	7,45	8,62	5,03	0,93	0,056	1,06	0,69	0,13	0,009
N08	59,2	7,49	8,13	5,20	1,43	0,14	1,45	0,65	0,17	0,012
N09	59,4	6,96	7,86	5,23	0,85	0,052	1,42	0,65	0,14	0,010
N10	59,0	8,10	7,93	5,24	0,90	0,067	1,46	0,65	0,16	0,009
N11	59,5	7,55	7,84	5,26	1,15	0,053	1,45	0,62	0,14	0,011
N12	60,1	6,90	7,97	5,24	0,85	0,053	1,43	0,65	0,08	0,010
N13	59,7	5,91	8,07	5,38	0,85	0,051	1,45	0,65	0,08	0,010
N14	59,4	6,46	8,00	4,64	0,98	0,059	1,43	0,60	0,08	0,015
N15	59,7	5,70	8,24	5,17	0,91	0,062	1,44	0,64	0,09	0,014
N16	59,6	7,21	8,07	5,21	0,95	0,068	1,41	0,65	0,10	0,012
N17	59,1	7,14	8,08	4,66	0,95	0,057	1,45	0,61	0,08	0,014
N18	59,6	6,44	7,99	5,17	0,91	0,063	1,40	0,65	0,09	0,017
N19	59,1	6,48	7,88	4,66	0,95	0,058	1,47	0,59	0,08	0,013

ERRATA

TÍTULO

Geometalurgia – estudos das características geológicas do minério de ferro e sua correlação com as características metalúrgicas do produto sinter gerado.

Sinter feed – é o produto do minério na mina de fração granulométrica de 6,35 mm a < 0,25 mm.

Pg. 84 FIGURA 24 – Onde se lê Mannesmann, leia-se Mannesmann-Vallourec

ATA Nº 015/2004

Às quatorze horas e dez minutos do dia dezesseis de dezembro de dois mil e quatro, no Anfiteatro do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica - CECO no Campus do Vale, reuniu-se a Comissão Examinadora constituída pelos Professores Doutores: Luis Augusto Marconi Scudeller (USIMINAS), Cláudio Batista Vieira (Universidade de Ouro Preto - UFOP) e Antonio César Faria Vilela (Centro de Tecnologia - UFRGS), para a defesa da Tese "**Caracterização Geometalúrgica dos Principais Minérios de Ferro Brasileiros – Fração Sinter Feed**" a que se submete LUCY TAKEHARA CHEMALE, depois de haver cumprido as exigências regulamentares do Programa. Após a abertura da sessão pelo Coordenador, Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima, o mesmo passou a presidência dos trabalhos ao orientador Prof. Dr. Farid Chemale Junior de acordo com o previsto no parágrafo primeiro do artigo cinquenta e seis do Regimento do Programa. A candidata fez a apresentação do seu trabalho e a seguir foi argüida pelos membros da Comissão Examinadora. Às dezoito horas e dez minutos, a sessão foi suspensa por vinte minutos para julgamento e atribuição dos conceitos, que foram os seguintes: Luis Augusto Marconi Scudeller "A" – (**Excelente**), Cláudio Batista Vieira "A" – (**Excelente**) e Antonio César Faria Vilela "A" – (**Excelente**). Face aos conceitos, foi conferido a candidata o grau de **DOUTOR EM CIÊNCIAS** pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Às dezoito horas e quarenta e cinco minutos a sessão foi encerrada, do que para constar, eu, Roberto Martins Pereira, lavrei a presente Ata que é assinada pela Comissão Examinadora.



Prof. Dr. Luis Augusto Marconi Scudeller


Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira


Prof. Dr. Antonio César Faria Vilela


Prof. Dr. FARID CHEMALE JUNIOR
(Presidente)

Homologação pela Comissão de Pós-Graduação,	
Ata nº 015/2004	Data: 17/12/2004
Conceito Final: A (EXCELENTE)	
Rubrica:	


Roberto Martins Pereira
Assistente em Administração Secretária
Identificação Única 003550729