

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

TESE DE DOUTORADO

“Caracterização Física, Química, Mineralógica
e Metalúrgica dos Produtos Granulados de
Minério de Ferro”

Autor: Eunírio Zanetti Fernandes

Orientador: Prof. PhD Armando Corrêa de Araújo

Maio de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas - CPGEM

Eunírio Zanetti Fernandes

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA
E METALÚRGICA DOS PRODUTOS GRANULADOS DE
MINÉRIO DE FERRO

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral
Orientador: Prof. PhD Armando Corrêa de Araújo

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2008

Esta Tese de Doutorado é dedicada aos meus **filhos Rodrigo, Lílian, Laila, neto Guilherme** e à **esposa Rosália**. Aos meus **pais Alcides** (à memória) e **Anna**, meu eterno agradecimento. Ao querido irmão **Euvidio** (à memória), eternas saudades e agradecimentos pela amizade, respeito e admiração mútuos.

Agradecimentos

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho e, em particular:

- **Vale**, Sistema Sul (DIFL), através do **Diretor Marcelo Fenelon**, pela oportunidade de ampliar a capacitação profissional.
- **Luiz Ezawa**, Gerente de Planejamento de Curto Prazo do Sistema Sul da Vale.
- **Myriam Souza Dias**, Gerente dos Laboratórios do Sistema Sul da Vale.
- **Raquel Guerra**, Supervisora do Laboratório Químico da Mina do Pico.
- **Laércio Reis Vieira**, Supervisor do Laboratório de Preparação de amostras.
- **Aloísio Antonio Melo Borges**, Gerente de Estudos Tecnológicos do Miguelão.
- **Prof. PhD da UFMG, Armando Corrêa Araújo**, pela orientação geral ao longo do trabalho, bibliografias e avaliações técnicas.
- **Prof. PhD Paulo Roberto G. Brandão**, pelas descrições mineralógicas e discussões técnicas.
- Aos Professores da banca de qualificação da UFMG: **Drs. Luiz Fernando Andrade de Castro, Paulo Roberto de Magalhães Viana, George Eduardo Sales Valadão e Luiz Cláudio M. Montenegro.**
- Aos Professores da banca de apresentação final da Tese: **Prof. Antônio Eduardo Clark Peres - Ph.D. (UFMG); Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão - Ph.D. (UFMG); Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana - Dr. (UFMG); Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro - Dr. (UFMG); Prof. Arthur Pinto Chaves - Dr. (USP); Prof. Luiz Marcelo Marques Tavares - Ph.D. (UFRJ).**
- Aos amigos e colegas **Luiz Eduardo, Ieso Coutinho, Emir Birro, Diniz Tamantini, Geraldo Omachi** e a todos os funcionários do planejamento do Complexo Paraopeba (Minas de CPX, MAZ, JGD e CFJ), pelo incentivo durante o trabalho.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	01
2 – OBJETIVOS.....	02
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
3.1 – Geologia Regional do Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais e outros grandes jazimentos de formações ferríferas	03
3.2 – Geologia local.....	22
3.2.1 – Minas do Pico, Sapecado e Galinheiro.....	23
3.2.2 – Mina de Abóboras.....	27
3.2.3 – Mina de Capitão do Mato.....	28
3.2.4 – Mina do Tamanduá.....	29
3.2.5 – Mina de Capão Xavier.....	30
3.2.6 – Mina de Jangada.....	31
3.3 – Normas internacionais para os ensaios metalúrgicos dos produtos granulados de minério de ferro.....	33
3.4 - Revisão bibliográfica dos produtos granulados de minério de ferro.....	41
3.5 - Procedimento padrão de amostragem e preparação de amostras de produtos granulados de minério de ferro.....	52
4 – METODOLOGIA	57
4.1 – Coleta de dados.....	57
4.1.1 – Sistemática de amostragem.....	57
4.1.2 – Preparação inicial das amostras.....	60
4.1.3 – Ensaios granulométricos.....	61
4.1.4 – Avaliação das tipologias presentes nas amostras.....	62
4.1.5 – Análises químicas.....	65
4.1.6 – Descrições mineralógicas.....	66
4.1.7 – Ensaios metalúrgicos e finos gerados pelos ensaios de tamboramento.....	68
5 – RESULTADOS OBTIDOS, DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO.....	69
5.1 – Caracterização granulométrica dos produtos granulados.....	69
5.2 – Caracterização química dos produtos granulados.....	72

5.3 – Caracterização tipológica dos produtos granulados.....	83
5.4 – Caracterização metalúrgica dos produtos granulados.....	91
5.5 – Caracterização mineralógica das tipologias dos produtos granulados....	114
5.6 – Caracterização química, tipológica e mineralógica das amostras de produtos granulados, aplicadas à interpretação dos resultados metalúrgicos.....	128
5.7 – Avaliação granulométrica, química e mineralógica das frações finas geradas pelos ensaios metalúrgicos de tamboramento.....	196
6 – CONCLUSÕES.....	205
7 – CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO.....	214
8 – RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	215
9 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	216
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	217
ANEXO 1: Procedimentos internos de laboratório para análises químicas via úmida.....	228
ANEXO 2: Ensaios granulométricos, separações tipológicas e peneiramento dos finos gerados nos ensaios metalúrgicos de tamboramento.....	239
ANEXO 3: Análises químicas via úmida das amostras dos produtos e das tipologias de cada amostra.....	250
ANEXO 4: Descrições mineralógicas das seções polidas das tipologias dos produtos granulados de minério de ferro.....	252
ANEXO 5: Tabelas de distribuição mineralógica das tipologias dos produtos granulados de minério de ferro.....	294
ANEXO 6: Tabelas do tamanho dos minerais, associados às tipologias dos produtos granulados, com base na microscopia ótica.....	297
ANEXO 7: Tabelas de distribuição mineralógica das frações finas ($<6,30 >1,00$ mm e $<1,00$ mm) das amostras geradas nos Ensaio metalúrgicos de tamboramento.....	299

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Distribuição das unidades cronoestratigráficas de alguns estados do Brasil.....	03
Figura 3.2 – Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero.....	09
Figura 3.3 – Mapa geológico e estrutural do Quadrilátero Ferrífero.....	10
Figura 3.4 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.....	11
Figura 3.5 – Mapa de localização das minas do Sistema Sul da CVRD.....	23
Figura 3.6 – Seção geológica típica da Mina do Pico, com base em furos de sonda.....	25
Figura 3.7 – Seção geológica típica da Mina do Sapecado, com base em furos de sonda.....	26
Figura 3.8 – Seção geológica típica da Mina do Galinheiro, com base em furos de sonda.....	26
Figura 3.9 – Seção geológica típica da Mina de Abóboras, com base em furos de sonda.....	27
Figura 3.10 – Seção geológica típica da Mina de Capitão do Mato, com base em furos de sonda.....	28
Figura 3.11 – Seção geológica típica da Mina do Tamanduá, com base em furos de sonda.....	30
Figura 3.12 – Seção geológica típica da Mina de Capão Xavier, com base em furos de sonda.....	31
Figura 3.13 - Seção geológica típica da Mina da Jangada, com base em furos de sonda.....	32
Figura 3.14 – Processo Midrex de redução direta de minério de ferro granulado.....	33 43
Figura 3.15 - Representações dos aspectos internos do alto-forno na produção de ferro gusa.....	45
Figura 4.1 – Fluxograma dos trabalhos de pesquisa desde as coletas das amostras até os ensaios de laboratório.....	58
Figura 4.2 – Amostragem automática dos produtos granulados.....	59
Figura 4.3 – Detalhe da amostragem automática dos granulados.....	59

Figura 4.4 – Preparação inicial de amostras com massa de 600 kg.....	60
Figura 4.5 – Quarteamento inicial da amostra em um sistema com divisões.....	61
Figura 4.6 – Peneiramento da amostra nas faixas granulométricas Padronizadas.....	61
Figura 4.7 – Detalhe do peneiramento inicial na tela de 31,50 mm.....	62
Figura 4.8 – Sistemática da separação tipológica dos fragmentos de minérios granulados.....	63
Figura 4.9 – Tipologias dos minérios compactos.....	63
Figura 4.10 – Tipologias dos minérios compactos porosos.....	64
Figura 4.11 – Tipologias dos minérios porosos.....	64
Figura 4.12 – Tipologias dos minérios itabiríticos.....	65
Figura 4.13 – Tipologia dos minérios associados à canga.....	65
Figura 4.14 – Padrão de denominação dos minerais descritos nas seções polidas.....	67
Figura 5.1 – Curvas de distribuições granulométricas de frequência simples.....	70
Figura 5.2 – Curvas de distribuições granulométricas de frequência acumuladas.....	71
Figura 5.3 – Curva de distribuição dos tamanhos médios das partículas das curvas granulométricas das amostras.....	72
Figura 5.4 – Fator de correlação negativo entre as variáveis ferro total e sílica.....	73
Figura 5.5 – Fator de correlação positivo entre as variáveis alumina e perda ao fogo (PPC).....	73
Figura 5.6 – Fator de correlação positivo entre as variáveis manganês e magnésio.....	74
Figura 5.7 – Fator de correlação negativo entre as variáveis alumina e ferro total.....	74
Figura 5.8 – Fator de correlação positivo entre as variáveis cálcio e magnésio, refletindo uma afinidade carbonatada.....	75
Figura 5.9 – Fator de correlação positivo entre as variáveis manganês e	

cálcio, associada a carbonatos.....	75
Figura 5.10 – Fator de correlação negativo entre as variáveis ferro total e FeO.....	76
Figura 5.11 – Fator de correlação levemente positivo entre as variáveis alumina e fósforo.....	76
Figura 5.12 – Fator de correlação negativo entre as variáveis químicas manganês e TiO ₂	77
Figura 5.13 – Distribuição dos teores médios de zinco, sódio e potássio, nas amostras dos produtos.....	78
Figura 5.14 – Gráfico das relações sódio/potássio nas amostras dos Produtos.....	79
Figura 5.15 – Teores de ferro total nas amostras médias dos produtos.....	79
Figura 5.16 – Teores de FeO nas amostras médias dos produtos.....	80
Figura 5.17 – Teores de sílica nas amostras médias dos produtos.....	80
Figura 5.18 – Teores de alumina nas amostras médias dos produtos.....	81
Figura 5.19 – Teores de fósforo nas amostras médias dos produtos.....	81
Figura 5.20 – Teores médios de manganês nas amostras dos produtos.....	81
Figura 5.21 – Teores médios de cálcio nas amostras médias dos produtos.....	82
Figura 5.22 – Teores médios de magnésio nas amostras médias dos produtos.....	82
Figura 5.23 – Teores médios de titânio nas amostras médias dos produtos.....	83
Figura 5.24 – Percentuais médios de perda por calcinação (PPC) nas amostras médias dos produtos.....	83
Figura 5.25 – Distribuição dos percentuais das tipologias nas amostras estudadas.....	84
Figura 5.26 – Distribuição dos teores de ferro total (FeO + Fe ₂ O ₃) nas amostras tipológicas.....	85
Figura 5.27 – Distribuição dos teores de FeO nas amostras tipológicas.....	86
Figura 5.28 – Distribuição dos teores de sílica nas amostras tipológicas.....	86
Figura 5.29 – Distribuição dos teores de alumina nas amostras tipológicas.....	87
Figura 5.30 – Distribuição dos teores de perda por calcinação (PPC) nas amostras tipológicas.....	88

Figura 5.31 – Distribuição dos teores de manganês nas amostras tipológicas.....	89
Figura 5.32 – Distribuição dos teores de cálcio nas amostras tipológicas.....	89
Figura 5.33 – Distribuição dos teores de magnésio nas amostras tipológicas..	89
Figura 5.34 – Distribuição dos teores de titânio nas amostras tipológicas.....	90
Figura 5.35 – Distribuição dos teores de fósforo nas amostras tipológicas.....	90
Figura 5.36 – Grau de metalização nas amostras de granulados.....	92
Figura 5.37 – Finos gerados nas amostras de granulados.....	92
Figura 5.38 – Liberação de enxofre nas amostras de granulados.....	93
Figura 5.39 – Índices de redutibilidade e RDI nas amostras de granulados.....	94
Figura 5.40 – Índices de crepitação nas frações <4,75 mm e <6,30 mm.....	95
Figura 5.41 – Índices de tamboramento (TI) e abrasão (AI) nas amostras de produtos granulados.....	96
Figura 5.42 – Correlação entre grau de metalização e finos gerados.....	97
Figura 5.43 – Correlação entre o grau de metalização e liberação de enxofre.....	97
Figura 5.44 – Correlação entre o grau de metalização e redutibilidade.....	98
Figura 5.45 – Correlação entre o grau de metalização e RDI.....	98
Figura 5.46 – Correlação entre o grau de metalização e índice de crepitação (fração <4,75 mm).....	99
Figura 5.47 – Correlação entre o grau de metalização e índice de crepitação (fração <6,30 mm).....	99
Figura 5.48 – Correlação entre o grau de metalização e índice de tamboramento.....	100
Figura 5.49 – Correlação entre o grau de metalização e índice de abrasão.....	100
Figura 5.50 – Correlação entre finos gerados e liberação de enxofre.....	101
Figura 5.51 – Correlação entre finos gerados e redutibilidade.....	101
Figura 5.52 – Correlação entre finos gerados e RDI.....	102
Figura 5.53 – Correlação entre finos gerados e índice de crepitação (<4,75 mm).....	102
Figura 5.54 - Correlação entre finos gerados e índice de crepitação (<6,30 mm).....	102

Figura 5.55 – Correlação entre finos gerados e índice de tamboramento.....	103
Figura 5.56 – Correlação entre finos gerados e índices de abrasão.....	103
Figura 5.57 – Correlação entre a liberação de enxofre (ppm) e reduzibilidade.....	104
Figura 5.58 – Correlação entre liberação de enxofre e RDI.....	104
Figura 5.59 – Correlação entre liberação de enxofre e crepitação (fração <4,75 mm).....	105
Figura 5.60 - Correlação entre liberação de enxofre e crepitação (fração <6,30 mm).....	105
Figura 5.61 – Correlação entre liberação de enxofre e índice de tamboramento.....	106
Figura 5.62 – Correlação entre liberação de enxofre e índice de abrasão.....	106
Figura 5.63 – Correlação entre reduzibilidade e RDI.....	107
Figura 5.64 – Correlação entre reduzibilidade e crepitação (fração <4,75 mm).....	107
Figura 5.65 – Correlação entre reduzibilidade e crepitação (fração <6,30 mm).....	108
Figura 5.66 – Correlação entre reduzibilidade e tamboramento.....	108
Figura 5.67 – Correlação entre reduzibilidade e abrasão.....	109
Figura 5.68 – Correlação entre RDI e crepitação (fração <4,75 mm).....	109
Figura 5.69 – Correlação entre RDI e crepitação (fração <6,30 mm).....	110
Figura 5.70 – Correlação entre RDI e tamboramento.....	110
Figura 5.71 – Correlação entre RDI e abrasão.....	110
Figura 5.72 – Correlação entre os índices de crepitação.....	111
Figura 5.73 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e tamboramento.....	112
Figura 5.74 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e abrasão....	112
Figura 5.75 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e tamboramento.....	113
Figura 5.76 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e abrasão.	113
Figura 5.77 – Correlação entre índice de tamboramento e abrasão.....	113
Figura 5.78 – Distribuição mineralógica nas tipologias compactas.....	114

Figura 5.79 – Distribuição mineralógica nas tipologias compactas porosas....	115
Figura 5.80 – Distribuição mineralógica nas tipologias porosas.....	116
Figura 5.81 – Distribuição mineralógica nas tipologias associadas à canga...	117
Figura 5.82 – Distribuição mineralógica nas tipologias itabiríticas.....	117
Figura 5.83 – Distribuição mineralógica na tipologia proto-minério.....	118
Figura 5.84 – Distribuição média da hematita granular nas tipologias.....	119
Figura 5.85 – Distribuição média da hematita sinuosa nas tipologias.....	119
Figura 5.86 – Distribuição média da martita nas tipologias.....	120
Figura 5.87 – Distribuição média da magnetita nas tipologias.....	120
Figura 5.88 – Distribuição média da hematita lamelar nas tipologias.....	121
Figura 5.89 – Distribuição média da hematita microcristalina nas tipologias.....	121
Figura 5.90 – Distribuição média da jacobsita nas tipologias.....	122
Figura 5.91 – Distribuição média da goethita nas tipologias.....	122
Figura 5.92 – Distribuição média da gibbsita nas tipologias.....	123
Figura 5.93 – Distribuição média do quartzo nas tipologias.....	123
Figura 5.94 – Distribuição do carbonato nas tipologias.....	124
Figura 5.95 – Distribuição dos agregados terrosos nas tipologias.....	124
Figura 5.96 – tamanho médio dos minerais (em μm) descritos nas tipologias.....	125
Figura 5.97 - Distribuição da porosidade relativa nas tipologias das amostras.....	126
Figura 5.98 - Tamanho médio dos poros (em μm) associados às tipologias definidas nas amostras objeto de estudo.....	127
Figura 5.99 – Correlação entre grau de metalização e teor de ferro total.....	129
Figura 5.100 – Correlação entre o grau de metalização e teor de sílica.....	129
Figura 5.101 – Correlação entre o grau de metalização e teor de alumina.....	130
Figura 5.102 – Correlação entre o grau de metalização e perda por calcinação.....	130
Figura 5.103 – Correlação entre finos gerados na redução direta e ferro total.	131
Figura 5.104 – Correlação entre finos gerados na redução direta e sílica.....	131
Figura 5.105 - Correlação entre finos gerados na redução direta e alumina....	132

Figura 5.106 - Correlação entre finos gerados na redução direta e perda por calcinação.....	132
Figura 5.107 – Correlação entre liberação de enxofre e ferro total.....	133
Figura 5.108 – Correlação entre liberação de enxofre e sílica.....	133
Figura 5.109 – Correlação entre liberação de enxofre e alumina.....	134
Figura 5.110 – Correlação entre liberação de enxofre e perda por calcinação.....	134
Figura 5.111 – Correlação entre redutibilidade e ferro total.....	135
Figura 5.112 – Correlação entre redutibilidade e sílica.....	135
Figura 5.113 – Correlação entre redutibilidade e alumina.....	135
Figura 5.114 – Correlação entre redutibilidade e perda por calcinação.....	136
Figura 5.115 – Correlação entre RDI e ferro total.....	136
Figura 5.116 – Correlação entre RDI e sílica.....	137
Figura 5.117 – Correlação entre RDI e alumina.....	137
Figura 5.118 – Correlação entre RDI e perda por calcinação.....	138
Figura 5.119 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e ferro total.....	138
Figura 5.20 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e ferro total.....	139
Figura 5.121 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e sílica.....	139
Figura 5.122 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e sílica.....	139
Figura 5.123 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e alumina..	140
Figura 5.124 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e alumina..	140
Figura 5.125 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e perda por calcinação.....	141
Figura 5.126 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e perda por calcinação.....	141
Figura 5.127 – Correlação entre índice de tamboramento e teor de ferro ferro total.....	142
Figura 5.128 – Correlação entre índice de abrasão e teor de ferro total.....	142
Figura 5.129 – Correlação entre índice de tamboramento e teor de sílica.....	143
Figura 5.130 – Correlação entre índice de abrasão e teor de sílica.....	143

Figura 5.131 – Correlação entre índice de tamboramento e alumina.....	144
Figura 5.132 – Correlação entre índice de abrasão e alumina.....	144
Figura 5.133 – Correlação entre índice de tamboramento e perda por calcinação.....	145
Figura 5.134 – Correlação entre índice de abrasão e perda por calcinação.....	145
Figura 5.135 – Associação do grau de metalização com as principais tipologias.....	147
Figura 5.136 – Distribuição dos percentuais das tipologias compactas e a linha de tendência dos valores.....	148
Figura 5.137 – Distribuição dos percentuais das tipologias compactas porosas e a linha de tendência dos valores.....	148
Figura 5.138 - Associação dos finos gerados com as principais tipologias.....	149
Figura 5.139 - Distribuição dos percentuais das tipologias porosas e a linha de tendência dos valores, com variabilidade elevada.....	149
Figura 5.40 - Distribuição dos percentuais das tipologias associadas à canga e a linha de tendência dos valores.....	150
Figura 5.141 - Distribuição dos percentuais das tipologias itabiríticas e a linha de tendência dos valores, onde a tipologia foi determinada.....	150
Figura 5.142 - Distribuição do percentual da tipologia de proto-minério, originada da alteração incompleta do minério dolomítico primário.....	150
Figura 5.143 - Associação da liberação de enxofre com as principais tipologias.....	151
Figura 5.144 - Associação da redutibilidade com as principais tipologias.....	152
Figura 5.145 - Associação do RDI com as principais tipologias.....	153
Figura 5.146 - Associação do índice de crepitação (fração <4,75 mm) com as principais tipologias.....	154
Figura 5.147 - Associação do índice de crepitação (fração <6,30 mm) com as principais tipologias.....	154
Figura 5.148 - Associação do índice de tamboramento (fração >6,30 mm) com as principais tipologias.....	155

Figura 5.149 - Associação do índice de abrasão (fração <0,50 mm) com as principais tipologias.....	156
Figura 5.150 – Grau de metalização (Midrex Linder Test) ordenado de forma crescente.....	158
Figura 5.151 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente do grau de metalização (Midrex Linder Test).....	158
Figura 5.152 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	159
Figura 5.153 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	159
Figura 5.154 – Distribuição de martita nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	160
Figura 5.155 – Distribuição de hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	160
Figura 5.156 – Distribuição de goethita nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	161
Figura 5.157 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	161
Figura 5.158 – Finos gerados (Midrex Linder Test) ordenados de forma crescente.....	162
Figura 5.159 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente dos finos gerados (Midrex Linder Test).....	162
Figura 5.160 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	163

Figura 5.161 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	163
Figura 5.162 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	163
Figura 5.163 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	164
Figura 5.164 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	164
Figura 5.165 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	165
Figura 5.166 – Liberação de enxofre em ppm, ordenados de forma crescente.....	165
Figura 5.167 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente da liberação de enxofre.....	166
Figura 5.168 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	167
Figura 5.169 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	167
Figura 5.170 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	168
Figura 5.171 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	168
Figura 5.172 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma	

crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	169
Figura 5.173 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	169
Figura 5.174 – Valores de redutibilidade, ordenados de forma crescente.....	170
Figura 5.175 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas de forma crescente de redutibilidade.....	170
Figura 5.176 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	171
Figura 5.177 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	171
Figura 5.178 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	172
Figura 5.179 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	172
Figura 5.180 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	173
Figura 5.181 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	173
Figura 5.182 – Valores de RDI ordenados de forma crescente.....	174
Figura 5.183 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente de RDI.....	175
Figura 5.184 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de	

correlação.....	175
Figura 5.185 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	176
Figura 5.186 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	176
Figura 5.187 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	177
Figura 5.188 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	177
Figura 5.189 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	178
Figura 5.190 – Valores dos índices de crepitação na fração <6,30 mm, ordenados de forma crescente.....	178
Figura 5.191 – Valores dos índices de crepitação na fração <4,75 mm, ordenados de forma crescente.....	179
Figura 5.192 – Distribuição mineralógica media das amostras ordenadas em ordem crescente de crepitação (fração <6,30 mm).....	179
Figura 5.193 – Distribuição mineralógica media das amostras ordenadas em ordem crescente de crepitação (fração <4,75 mm).....	180
Figura 5.194 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	181
Figura 5.195 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de	

forma crescente aos índices de crepitação na fração tendência e respectivo coeficiente <4,75 mm, com linha de de correlação.....	181
Figura 5.196 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	182
Figura 5.197 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	182
Figura 5.198 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	183
Figura 5.199 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	183
Figura 5.200 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	184
Figura 5.201 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	184
Figura 5.202 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	184
Figura 5.203 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma	

<p>crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....</p>	185
<p>Figura 5.204 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....</p>	185
<p>Figura 5.205 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....</p>	186
<p>Figura 5.206 – Valores dos índices de tamboramento (TI), fração >6,30 mm ordenados de forma crescente.....</p>	187
<p>Figura 5.207 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente aos índices de tamboramento (fração >6,30 mm).....</p>	187
<p>Figura 5.208 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....</p>	188
<p>Figura 5.209 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....</p>	188
<p>Figura 5.210 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....</p>	189
<p>Figura 5.211 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....</p>	189

Figura 5.212 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	190
Figura 5.213 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas e forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	190
Figura 5.214 – Valores dos índices de abrasão (AI), fração <0,50 mm, ordenados de forma crescente.....	191
Figura 5.215 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente aos índices de abrasão (fração <0,50 mm).....	191
Figura 5.216 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	192
Figura 5.217 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	192
Figura 5.218 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	193
Figura 5.219 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	193
Figura 5.220 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de	

correlação.....	194
Figura 5.221 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.....	194
Figura 5.222 – Curvas de distribuição granulométrica das frações abaixo de 6,30 mm, derivadas dos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.....	197
Figura 5.223 – Teores de ferro total nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro....	197
Figura 5.224 – Teores de FeO nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro....	198
Figura 5.225 - Teores de sílica nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.....	199
Figura 5.226 - Teores de alumina nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.....	199
Figura 5.227 - Teores de perda por calcinação (PPC) nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.....	200
Figura 5.228 – Teores de perda por calcinação (PPC) nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento e das amostras médias dos produtos.....	201
Figura 5.229 – Correlação entre sílica e alumina na fração <1,00 mm.....	201
Figura 5.230 – Correlação entre alumina e perda por calcinação na fração <1,00 mm.....	201
Figura 5.231 – Distribuição mineralógica na fração <6,30 >1,00 mm, dos finos gerados nos ensaios de tamboramento.....	202
Figura 5.232 – Distribuição mineralógica na fração <1,00 mm, dos finos gerados nos ensaios de tamboramento.....	203
Figura 5.233 – Distribuição dos percentuais mineralógicos da goethita, gibbsita e quartzo nas frações <6,30 >1,00 mm e <1,00 mm...	203
Figura 5.234 – Distribuição média dos minerais goethita, gibbsita e quartzo	

nas tipologias e nas frações geradas pelos ensaios de tamboramento.....	204
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Características comerciais dos produtos granulados utilizados como redução direta e alto-forno.....	42
Tabela IV.1 – Tabela dos elementos químicos analisados via úmida.....	66
Tabela IV.2 – Testes metalúrgicos dos produtos granulados.....	68
Tabela IV.3 – Separação dos finos gerados pelos testes de tamboramento.....	68
Tabela V.1 – Distribuições granulométricas de frequência simples.....	69
Tabela V.2 – Distribuições granulométricas de frequência acumuladas.....	71
Tabela V.3 – Análises químicas dos elementos zinco, sódio e potássio e correlação Na/K.....	78
Tabela V.4 – Resumo dos resultados dos testes metalúrgicos nas amostras de produtos granulados.....	91
Tabela V.5 – Teores médios dos elementos maiores das amostras dos produtos.....	128
Tabela V.6 – Quadro resumo das correlações entre as variáveis metalúrgicas e as principais variáveis químicas.....	146
Tabela V.7 – Resumo das influências da caracterização tipológica nas variáveis metalúrgicas de produtos granulados de minério de ferro.....	157
Tabela V.8 – Resumo das correlações entre os principais minerais e a porosidade relativa, com as variáveis metalúrgicas.....	195
Tabela V.9 – Principais variáveis associadas aos finos gerados pelo tamboramento.....	204

LISTA DE NOTAÇÕES

São detalhados a seguir os termos técnicos mais importantes citados nos capítulos:

- **Acamamento:** camadas com diferentes espessuras (centimétricas a milimétricas), geralmente com diferenças composicionais que conferem à rocha colorações diferentes.
- **Bandamento composicional:** estrutura sedimentar primária, formada pela alternância entre sílica e óxidos de ferro, formando camadas claras e escuras.
- **Coluna estratigráfica:** representação do sequenciamento das unidades litológicas por idade de formação, partindo da mais antiga (parte inferior) para a mais jovem (parte superior da coluna estratigráfica).
- **Cráton:** rochas antigas do embasamento cristalino de uma região, geralmente rejuvenescida nas bordas pelos processos geológicos orogênicos posteriores à sua formação.
- **Foliação:** estrutura originada por deformação tectônica da rocha, associada a dobramentos e metamorfismo, dando uma forte orientação à litologia, sendo um plano de fraqueza bem definido.
- **Ga (Giga ano):** 1 bilhão de anos.
- **Granulado denominado de LO (lumpy ore):** produto derivado de minério de ferro, com granulometria entre 31,50 a 6,30 mm.
- **Hipogênico:** processo de alteração interna, devido à ação de eventos hidrotermais, diques, sills, alterando a composição original de um minério ou rocha pré-existente.
- **Kink band:** dobra de torção, ocorrendo de forma repetitiva, sistemática.

- **Lixiviação:** processo de alteração supergênica, onde ocorre a retirada de elementos químicos por processos de solução, ocorrendo trocas químicas importantes e enriquecimentos relativos de compostos químicos que formam jazidas de minérios exploráveis.
- **Medida em ppm:** teor de um elemento químico em partes por milhão.
- **µm:** medida de tamanho em micrômetro.
- **Minério associado à canga:** predomina a coloração vermelha amarelada, pelo alto grau de alteração supergênica. Geralmente situado próximo à superfície.
- **Minério hematítico compacto:** predominam faces lisas, sem porosidade.
- **Minério hematítico compacto poroso:** são identificados poros dispersos nas faces compactas.
- **Minério hematítico poroso:** predominam as faces com poros milimétricos a sub-milimétricos, tornando a face mais rugosa.
- **Minério itabirítico:** fragmentos achatados com bandas onde predominam as alternâncias entre hematita e itabirito.
- **Proto-minério:** rocha original, geralmente alterada e que deu origem ao minério atual.
- **Quarteamento:** processo de redução da massa de amostra, sem comprometer a representatividade.
- **Relicto:** denominação utilizada quando um determinado mineral resiste ao processo de recristalização ou alteração, geralmente com outro mineral recristalizado nas bordas. Exemplo: magnetita com magnetita recristalizada ao redor.

- **Supergênico:** processo de alteração mais superficial, sendo a água o principal agente de modificação química e física. Ocorre enriquecimento de ferro, com relação ao minério primário, com redução de sílica, carbonatos e outras substâncias químicas solúveis.
- **Tamanho médio de partícula (TMP):** calculado pela média ponderada dos percentuais das faixas granulométricas, considerando o tamanho médio de cada faixa.
- **Teor médio:** calculado pela média ponderada pelos percentuais granulométricos ou tipológicos que está sendo considerado.
- **Tipologia:** representa os tipos de fragmentos do produto granulado, avaliar a massa de cada tipo, bem como características químicas e mineralógicas com o apoio de lupa binocular. Tipologia compacta (CO); tipologia compacta porosa (CP); tipologia porosa (PO); tipologia associada à canga (CA); tipologia associada à proto-minério (PM) e tipologia associada à itabiritos (IB).
- **Trama:** estrutura de um tipo litológico, envolvendo estruturas como bandamento, foliação, arranjo mineralógico e textural.

RESUMO

O objetivo do trabalho é a caracterização tecnológica dos produtos granulados de minério de ferro, através do estudo das correlações químicas, físicas, tipológicas, metalúrgicas e mineralógicas de 11 amostras de produtos das minas do Sistema Sul da Vale. Em termos de distribuição granulométrica, os percentuais maiores estão concentrados entre as frações 31,50 e 12,50 mm. As correlações químicas positivas mais importantes são: alumina e perda por calcinação; manganês e magnésio; cálcio e magnésio; manganês e cálcio, alumina e fósforo e as correlações negativas são: ferro total e sílica; ferro total e alumina; ferro total e FeO, manganês e titânio. Os teores médios de zinco, sódio e potássio das onze amostras foram muito baixos. Predominam as tipologias compactas e compactas porosas, com características hipogênicas e as tipologias porosas, associadas à canga, itabiritos e proto-minério, derivaram de alteração supergênica dos minérios de ferro. Os teores de ferro são mais elevados nas tipologias compactas e os teores de alumina e perda por calcinação são mais elevados nas tipologias associadas à canga. Os índices metalúrgicos são correlacionados ao grau de alteração, percentuais das tipologias e às principais variáveis químicas. Em termos mineralógicos a hematita granular e sinuosa apresenta percentuais mais elevados nas tipologias compactas, compactas porosas e porosas, com comportamento específico em relação aos índices metalúrgicos, enquanto a martita hematita lamelar, goethita e gibbsita aumentam seus percentuais nas tipologias porosas, canga, itabiríticas e proto-minério e se comportam da mesma forma frente aos índices metalúrgicos. A hematita micro cristalina e jacobsita são restritas à tipologia proto-minério. A porosidade relativa aumenta das tipologias compactas para as porosas, canga, itabiríticas e proto-minério. O tamanho médio dos poros é maior nas tipologias porosas, cangas, itabiríticas e proto-minério. A avaliação tipológica pode ser utilizada na avaliação metalúrgica preliminar. Os finos gerados nos ensaios de tamboramento foram estudados com o objetivo de avaliar os efeitos do manuseio e transporte de produtos granulados de minério de ferro, tendo sido determinada a importância das variáveis granulométricas, químicas e mineralógicas na agregação das frações finas.

ABSTRACT

The main purpose of this thesis is the technological characterization of iron ores' granulated products (lump ores), through of study of chemical and physical correlations, typologies, metallurgical behavior and mineralogy of eleven from Vale's South System mines. In terms of granulometric distribution, the majors percentages are concentrated between fractions 31,50 to 12,50 mm. The most important chemical correlations are: alumina and loss of ignition; manganese an magnesium; calcium and magnesium; manganese and calcium, alumina and phosphorus and the main negative correlations are: iron total and silica; iron total and alumina; iron total and FeO; manganese and titanium. The average grades of zinc, sodium and potassium of eleven samples were very low. The compact and compact porous typologies are predominate, with hipogenic characteristics and porous, associated to canga, itabirites and proto ore typologies, derived from iron ores supergene alteration. The iron's grades are higher in the compact typologies and alumina's grades and loss of ignition are higher in the typologies associated to canga. The metallurgic indexes are correlated to alteration grade, percentage of typologies and main chemical variables. In mineralogical terms the granular and sinuous hematites present higher percentages in compact, compact porous and porous typologies, with an specific behavior relating to metallurgic indexes, while martite, lamellar hematite, goethite and gibbsite increase their percentages in porous, canga, itabirite and proto ore typologies and their behavior is the same related to metallurgic indexes. The microcrystalline hematite and jacobsite are restricted to proto ore typology. The relative porosity increase from compact typology to porous, canga, itabiritic and proto ore typologies. The average sizes of porous are large in porous, cangas, itabiritics and proto ore typologies. The typologic evaluation could be used in preliminary metallurgic evaluation. The fine generated by tumbler assays were studied with objective to evaluate the effect of handing and transport of iron ore's granulated products, has been determined the importance of granulometric, chemistry and mineralogic variables in aggregation of fine fractions.

EUNÍRIO ZANETTI FERNANDES

“CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA E METALÚRGICA
DOS PRODUTOS GRANULADOS DE MINÉRIO DE FERRO”

“PHYSICAL, CHEMICAL, MINERALOGICAL AND METALLURGICAL
CHARACTERIZATION OF IRON ORE’S GRANULATED PRODUCTS”

PALAVRAS-CHAVE

Minério de Ferro

Tipologia

Granulado

Metalurgia

Mineralogia

Química

Granulometria

Correlação

Compacto

Poroso

Canga

Itabirito

Crepitação

Tamboramento

Manuseio

Redutibilidade

Degradação

Proto-minério

KEY WORDS

Iron Ore

Typology

Granulated

Metallurgy

Mineralogy

Chemistry

Ganulometry or Size Fraction

Correlation

Hard, Compact, Massive

Porous

Canga

Itabirite

Decrepitation

Tumbling (Tumble)

Handling

Reducibility

Degradation

Proto ore

1 - INTRODUÇÃO

A indústria do minério de ferro contribui com aproximadamente 15% do valor total da produção mineral brasileira, superado apenas pelo petróleo. Em termos de exportação, representa cerca de 80% dos bens minerais primários do país e em torno de 5% das exportações totais brasileiras (Quaresma, 2001).

A estrutura geológica regional do estado de Minas Gerais, denominada de Quadrilátero Ferrífero, é considerada um dos mais importantes distritos de mineração de ferro do mundo. Está situado na borda sudeste das rochas antigas pertencentes ao Cráton de São Francisco. As minas de ferro do Sistema Sul da Vale, estão localizadas ao longo do Quadrilátero Ferrífero, com distâncias máximas de 50 km da cidade de Belo Horizonte.

Os produtos granulados destinados para altos-fornos e redução direta, produzidos apenas pela cominuição por britagem e peneiramento, representam significativos ganhos financeiros na indústria do minério de ferro, quando comparados com os derivados mais finos, principalmente sinter feed (SF) e pellet feed fines (PFF).

A gênese diferenciada dos corpos geológicos, principalmente por características litológicas e estruturais, proporcionou particularidades tecnológicas fundamentais nos produtos gerados em cada mina.

O melhor conhecimento das características químicas, físicas, metalúrgicas e mineralógicas dos derivados granulados de minério de ferro, constitui-se em um diferencial importante de competitividade junto aos mercados mundiais, pois o uso “in natura” não permite absorver variações significativas de qualidade na siderurgia.

2 - OBJETIVOS

A presente tese tem como objetivo técnico aplicado, a caracterização química, física, mineralógica e metalúrgica dos produtos granulados das minas de ferro do Sistema Sul da Vale, ampliando o conhecimento das propriedades tecnológicas dos produtos destinados à indústria siderúrgica. Em termos comerciais, busca ampliar a compreensão do comportamento dos produtos granulados ao longo do sistema produtivo e embarque, enfocando a geração de finos pelo manuseio e transporte.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente é feita uma revisão dos principais trabalhos sobre o Quadrilátero Ferrífero, abordando, principalmente, as teorias genéticas. No segundo tópico são enfocadas as publicações disponíveis sobre os produtos granulados de minério de ferro, incluindo trabalhos internos de pesquisa. No terceiro tópico, são descritas as normas de preparação de amostras de produtos granulados e no quarto item são abordadas as normas internacionais para ensaios metalúrgicos.

3.1 – Geologia regional do Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais e outros grandes jazimentos de mineralizações ferríferas

A cada um dos momentos ou divisões da história terrestre os estudiosos deram o nome de Era Geológica. No mapa geológico da figura 3.1, encontram-se distribuídos os grandes conjuntos litológicos de parte do Brasil e suas idades de formações, inseridas nas denominadas “Eras Geológicas”.

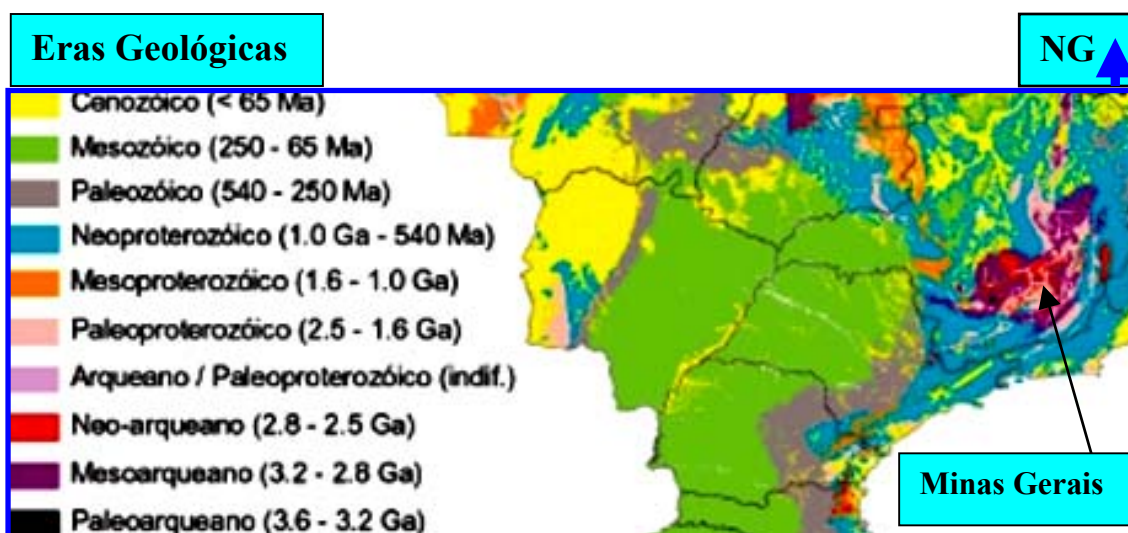


Figura 3.1 – Distribuição das unidades cronoestratigráficas de alguns estados do Brasil, representando as principais unidades litoestratigráficas do mapa geológico da CPRM (Companhia de pesquisas de Recursos Minerais), agrupadas de acordo com as Eras Geológicas (segundo Bizzi et al., 2003).

As grandes ocorrências geológicas de formações ferríferas mundiais foram formadas durante o intervalo de 2.6 a 1.8 Ga (Eichler, 1976), correspondendo às Eras Geológicas de idade Arqueana (Paleoproterozóica a Neo-arqueana). A idade de formação do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais encontra-se inserida em um conjunto litológico Meso-arqueano, Neo-arqueano e Arqueano (figura 3.1).

São descritos a seguir os principais eventos associados às Eras Geológicas da terra.

Era Pré-Cambriana

Os cientistas criaram uma escala de tempo que divide a história da Terra em eras. Estas eras, por sua vez, são divididas em períodos, os quais se dividem em épocas. A mais longa dessas divisões temporais foi a era Pré-Cambriana, subdividida em Arqueano (4,6 a 2,5 Ga) e Proterozóico (2,5 Ga a 542 milhões de anos), segundo a International Commission on Stratigraphy (2008). Durante esse tempo, a vida no mar se desenvolveu desde as minúsculas e gelatinosas bolhas flutuantes até os primeiros vermes.

A mais antiga e mais vasta divisão do tempo geológico (gr. proteros = primeiro + zoé= vida). O seu início não é ainda definitivamente conhecido, ultrapassando, entretanto, a casa dos quatro bilhões de anos (estimativa baseada na radioatividade); o seu término deu-se aproximadamente há 500 milhões de anos. Designam-se comumente como pré-cambrianos os terrenos formados durante essa era. Constituem-se de rochas metamórficas (gnaiesses, xistos) intensamente dobradas e falhadas e rochas ígneas (granitos, etc.). A sua importância econômica é muito grande, porque nos terrenos dessa era estão as maiores reservas de ferro conhecidas, manganês, etc., sem mencionar-se ouro, cobre, níquel, prata, pedras preciosas, material de construção, etc. Distribuem-se os terrenos pré-cambrianos largamente pelo mundo, sendo as suas áreas maiores de ocorrência chamadas "escudos". Na Austrália constituem o Escudo Australiano; na África, o Escudo Etiópico; na Ásia, o Escudo Angárico; na Europa, o Escudo Báltico; e, na América do Sul formam dois escudos principais: o Escudo Guianense, ao norte do Rio Amazonas, e o Escudo Brasileiro, ao sul daquele rio. Fósseis de idade pré-cambriana são comparativamente raros: estruturas possivelmente originadas por algas

(Collenia, etc.), moldes de medusas, etc. A ocorrência de rochas grafitosas em terrenos desta era sugere vida orgânica, enquanto os depósitos de ferro e de calcário são considerados por muitos autores como sendo resultantes da atividade de bactérias.

Era Paleozóica

Também pode ser chamada de Era Primária, esta divisão do tempo geológico seguinte à Era Proterozóica e a antecedente à Era Mesozóica. A sua duração foi de aproximadamente 380 milhões de anos. Embora a vida já se achasse presente na Era Proterozóica, é nos terrenos mais antigos da Era Paleozóica que os vestígios de organismos se mostram mais abundantes. Divide-se em seis períodos que, na ordem dos mais antigos para os mais modernos, são os seguintes: Cambriano, Ordoviciano, Siluriano, Devoniano, Carbonífero e Permiano. De acordo com os dados paleontológicos, no cambriano achavam-se presentes todos os grandes grupos de invertebrados. As formas ancestrais da fauna cambriana são desconhecidas ou porque o elevado metamorfismo e os dobramentos a que foram sujeitas as rochas da Era Proterozóica as destruíram, ou porque a erosão apagou grande parte dessa documentação antes da deposição dos sedimentos cambrianos. Os animais do início da Era Paleozóica viveram predominantemente em ambiente marinho: graptólitos, trilobites, moluscos, briozoários, braquiópodes, equinodermos, corais, etc. Os peixes surgiram no Ordoviciano, nas águas doces. As plantas terrestres mais antigas conhecidas datam do Siluriano (Austrália). No Carbonífero e também no Permiano constituíram grandes florestas das quais se originaram carvões em várias partes do mundo. Especialmente curiosas foram as Pteridospermae, vulgarmente conhecidas como "fetos com sementes". Os insetos mais antigos datam do Devoniano. Os anfíbios surgiram no Devoniano e os répteis no Carbonífero. Angiospermas, aves e mamíferos apareceram mais tarde, na Era Mesozóica. A paleogeografia da Era Paleozóica é a matéria de controvérsia. As similaridades demonstradas entre a geologia da parte meridional da América do Sul, África do Sul, Índia e Austrália- flora fóssil comum, designada flora de Glossopteris, vestígios de glaciação tipo inlandsis, aparentemente da mesma idade, levaria, segundo certos autores, à aceitação de um antigo continente, Continente de Gondwana, reunindo

tais regiões, ou, segundo outros, à suposição de que elas estiveram diretamente unidas até o fim da Era Mesozóica (teoria de Wegener). Dois ciclos orogenéticos importantes ocorreram na Era Paleozóica: dobramentos coledonianos do Siluriano e dobramentos hercinianos do Carbonífero. Vários grupos de animais e de plantas foram privativos da Era Paleozóica: Psilophytales, vegetais que desapareceram no Devoniano; trilobites, euripterídeos, granptólitos, corais dos grupos tetracorais e tabulados; briozoários dos grupos Trepostomados e Criptostomados; foraminíferos da família dos Fusulinídeos; equinodermos dos grupos cistóides, blastóides e heterostelados; peixes dos grupos Ostracodermas e Placodermas.

Era Mesozóica

Também chamada de Era Secundária. Penúltima das eras em que se divide a história da Terra. Conhecida como a Idade dos Répteis ou Idade dos Amonides, pela importância que esses dois grupos atingiram durante os 140 milhões de anos da sua duração. O nome vem do grego mesos que significa meio, e zoé que indica vida, isto é, vida intermediária. Dos répteis mesozóicos os dinossauros são os mais conhecidos. Atingiram tamanhos gigantescos e se extinguiram no fim da Era Mesozóica. Alguns répteis adaptaram-se à vida aquática. Nos mares, proliferaram cefalópodes do grupo dos Amonites, que igualmente se extinguiram no ocaso desta era. Surgiram os peixes teleósteos, as primeiras aves (criaturas exóticas dotadas, no início, de dentes e de cauda), os primeiros mamíferos, as primeiras plantas do grupo dos angiospermas. A Era Mesozóica recebeu também o nome de Idade das Cicadófitas, graças à importância que tal grupo de vegetais alcançou nesta era. Divide-se em três períodos, do mais antigo para o mais moderno: Triásico, Jurásico e Cretáceo. Movimentos orogenéticos importantes afetaram durante a Era Mesozóica a região andina e a região das Montanhas Rochosas. Mas as presentes cadeias são devidas inteiramente a movimentos subsequentes. No Brasil, os terrenos mesozóicos cobrem vastas áreas do interior do país, ocorrendo ainda na orla marítima no nordeste. No sul, no início da Era Mesozóica, o clima foi árido, originando-se vasto deserto com deposição abundante de áreas eólicas. Tal deposição foi entremeada de intenso vulcanismo, responsável por derrames

de lava de grande extensão. Seguiu-se a deposição no Período Cretáceo, de areias que mais tarde foram consolidadas por cimento calcário e que encerraram restos de dinossauros e de outros répteis. Nos terrenos cretáceos do nordeste, boa parte dos quais marinhos, ocorrem importantes jazidas de calcário, fosforita e petróleo.

Era Cenozóica

O princípio da Era Cenozóica marca a abertura do capítulo mais recente da história da Terra. O nome desta era provém de duas palavras gregas que significavam vida recente. Durante a Era Cenozóica, que principiou há cerca de 60 milhões de anos, a face da Terra assumiu sua forma atual. A vida animal transformou-se lentamente no que hoje se conhece, porque nela se desenvolveu o ser humano. A Era Cenozóica divide-se em dois períodos principais, dos quais o mais antigo, denominado Período Terciário, subdivide-se em cinco épocas: Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno e Plioceno. O Período Quaternário, sucedente, subdivide-se em Pleistoceno e Holoceno ou Atual. Durante todo o Período Terciário houve muita atividade vulcânica e formaram-se os grandes maciços montanhosos do mundo, como os Andes, os Alpes e o Himalaia. Com efeito a Era Cenozóica foi marcada pelo aparecimento de 28 ordens de mamíferos, 16 das quais ainda vivem. No paleoceno e no Eoceno viveram mamíferos de tipo arcaico que no fim do Eoceno e no Oligoceno foram substituídos, exceto na América do Sul, pelos ancestrais dos mamíferos modernos. No decorrer de milhões e milhões de anos deu-se a modernização das faunas que culminou na produção de mamíferos adiantados, especializados, do mundo moderno. Os processos que conduziram à elaboração das faunas modernas datam do Pleistoceno e do pós-Pleistoceno. Distingue-se a fauna atual da fauna do Pleistoceno, principalmente pelo empobrecimento, advindo da extinção de várias formas. A América do Sul achava-se unida à América do Norte no início da Era Cenozóica; tal união manteve-se interrompida durante grande parte dessa era, voltando a ser restabelecida no fim do Terciário. Isso explica certas peculiaridades faunísticas do nosso continente. Por outro lado, a América do Norte manteve ligação com a Ásia através da região de Bering (hoje interrompida pelo Estreito de Bering) durante grande parte da Era Cenozóica, o que explica o porquê da homogeneidade faunística da

América do Norte, Ásia Setentrional e Europa. As peculiaridades faunística da Austrália, por sua vez, são devidas ao isolamento que manteve desde o Cretáceo em relação à Ásia. A forma ancestral do cavalo data do Eoceno e recebeu o nome de *Eohippus*; viveu no hemisfério norte. O *Equus*, isto é, cavalo propriamente dito, surgiu na América do Norte bem mais tarde, donde migrou para a Ásia, no Pleistoceno. No Pleistoceno, também chamado época Glacial ou Idade do Gelo, ocorreu uma vasta glaciação no hemisfério norte. Glaciação de muito menores proporções deu-se também no hemisfério sul. Datam do Pleistoceno os mais antigos restos do homem (cerca de 450.000 anos). Acredita-se que o mais antigo deles seja o *Homo heidelbergensis*. Há controvérsia sobre a idade do *Homo sapiens*; segundo alguns autores o seu aparecimento deu-se há cerca de 250.000 anos, isto é, antes mesmo do *Homo neanderthalsis*. No Pleistoceno inferior vivem hominídeos vários: *Australopithecus*, da África do Sul; *Homo erectus*. Inúmeras localidades brasileiras forneceram ossadas de mamíferos pleistocênicos. Os achados mais famosos são os das grutas de Minas Gerais, pacientemente pesquisados por Peter Lund no século passado. Outra localidade curiosa é a de Águas do Araxá, também em Minas Gerais, onde parte do material obtido acha-se exposta. Aí foram descobertos cerca de 30 indivíduos de mastodontes fósseis (*Haplomastodon waringi*). Megatérios, gliptodontes, tigres dentes-de-sabre (*Smilodon*) e toxodontes figuram entre os mamíferos pleistocênos mais comuns. A ligação entre as duas Américas no Pleistoceno trouxe como conseqüência uma imigração de carnívoros que não existiam por aqui, os chamados tigres dente-de-sabre. A antigüidade do homem no Brasil é matéria de controvérsia. Não foi ainda cabalmente provada a Idade Pleistocênica do homem da Lagoa Santa cujos ossos aparecem nas mesmas grutas em que ocorrem animais extintos (Serra da Capivara).

O Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais foi estudado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), em um projeto conjunto com o DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral), no período de 1946 a 1963. Os estudos geológicos foram sumariados por Dorr (1969). Posteriormente, o Quadrilátero tem sido alvo de muitos trabalhos geológicos feitos por vários autores, dentre os quais Ladeira e Viveiros (1984), Marshak e Alkmin (1989), Chemale Jr. et al. (1994), Renger et al. (1994) e Alkmin e Marshak (1998). As principais unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero são os granitos e gnáisses de idade Arqueana a Paleoproterozóica, seqüências

Arqueanas denominadas de “greenstone belt”, representadas pelo Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e rochas intrusivas pós-Minas (figuras 3.2 e 3.3).

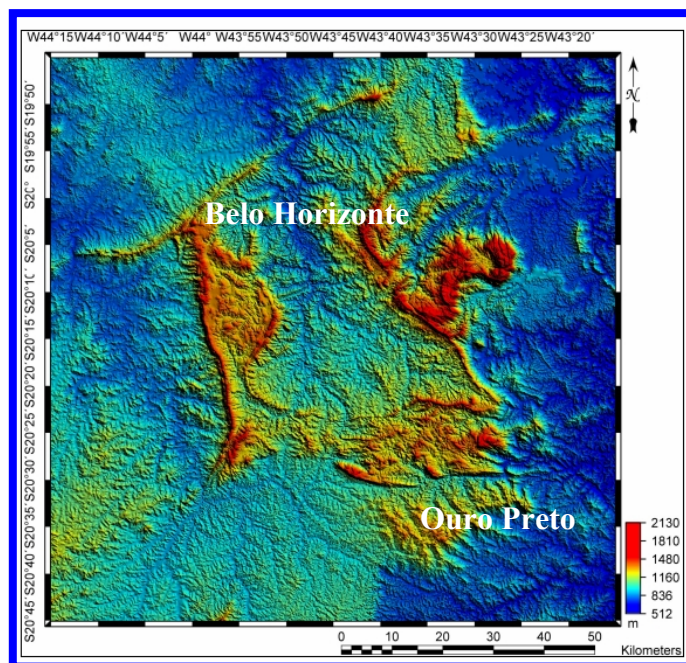


Figura 3.2 – Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero. Modelo digital do terreno, com as altitudes médias (base de dados: Prodemge. Minas Gerais, 2003).

Os grandes depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero estão localizados nos sedimentos de plataforma do Supergrupo Minas, englobados em três seqüências metamórficas Paleoproterozóicas (Renger et al. 1994; Noce, 1995; Babinsky et al. 1995). A unidade estratigráfica mais inferior é o Grupo Caraça, que consiste de um conglomerado aluvial e arenitos, gradando superiormente para pelitos marinhos de águas rasas. O Grupo Itabira intermediário é formado por rochas sedimentares químicas. Uma extensa camada de formação ferrífera, com composição variada, ocorre na base do grupo Itabira, junto com filitos dolomíticos e hematíticos, margas e dolomitos, abrangendo a Formação Cauê. A seqüência grada superiormente para rochas dolomíticas e itabiritos dolomíticos manganésíferos de 2.4 G.a. da Formação Gandarela (Babinsky et al. 1995). Sedimentos clásticos do Grupo Piracicaba ocorrem sobre o Grupo Itabira. A seqüência estratigráfica mais superior do Supergrupo Minas é o Grupo Sabará, composta por uma seqüência metamórfica conglomerática, formação ferrífera bandada, vulcanoclásticos e turbiditos (Renger et al. 1994).

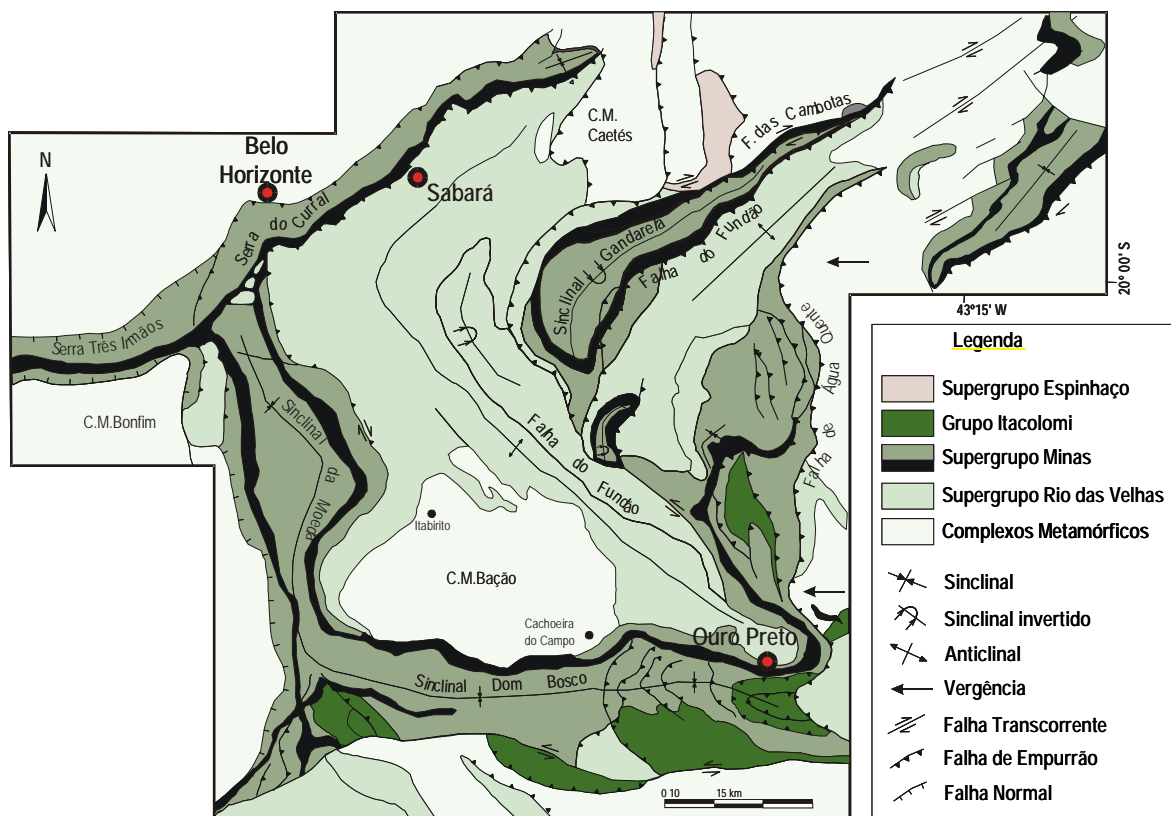


Figura 3.3 – Mapa geológico e estrutural simplificado do Quadrilátero Ferrífero, compilado a partir do trabalho de Dorr (1969).

Os corpos intrusivos graníticos, pegmatíticos, diabásios e diques máficos metamórficos, cortam o Supergrupo Minas e Rio das Velhas. Os granitos e pegmatitos, com idades entre 2.06 e 2.08 Ga, respectivamente, cortam as rochas do embasamento (Noce, 1995). Diques máficos metamórficos foliados ocorrem através do Quadrilátero Ferrífero, sendo um deles datado em 1.714 Ga (Alkmim e Marshak, 1998). Diques de diabásios e gabros ocorrem localmente, não afetados por metamorfismo (Pomerene, 1964 e Wallace, 1965). A coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero encontra-se sumariada na figura 3.4.

Em termos estruturais o Quadrilátero Ferrífero consiste de dois domínios principais: um domínio leste de alta tensão e um domínio oeste de baixa tensão (Rosière et al. 2001). O padrão é dominado por zonas de cisalhamentos transcorrentes e empurrões, gerando dobras apertadas a isoclinais e zonas milonitizadas delgadas. As principais estruturas regionais decorrentes dos processos estruturais já citados são megassinclinais (ou mega-

sinclinais) bem preservados com zonas de cisalhamento descontínuas e falhas inversas (Almeida, 1977; Chemale et al., 1994; Rosière et al. 2001). Os depósitos de minério de ferro ocorrem nos dois domínios estruturais. As deformações locais definem as particularidades de cada domínio.

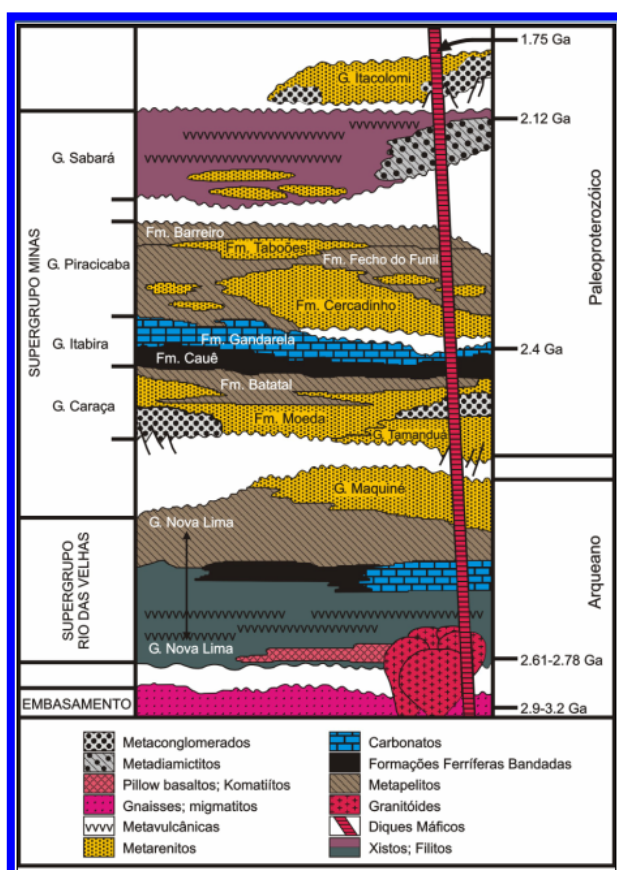


Figura 3.4 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, com base no trabalho de Alkmim e Marshak (1998).

As unidades litológicas do Supergrupo Rio das Velhas foram fortemente deformadas antes da deposição do Supergrupo Minas. Juntamente com complexos graníticos gnáissicos, atuaram como embasamento da bacia Proterozóica Minas (Marshak et al. 1992). Entre 2.6 e 2.4 Ga a região evoluiu para uma bacia de margem passiva, onde foram depositados os sedimentos do Supergrupo Minas.

As unidades supracrustais dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas foram submetidas a dobramentos em larga escala, formando anticlinais e sinclinais e o embasamento cristalino subjacente foi soerguido. Zonas de cisalhamentos foram formadas nas regiões

de contato do embasamento e rochas supracrustais. Chemale et al. (1994) enfatizaram o desenvolvimento de megassinclinais e a elevação das rochas do embasamento cristalino a um evento estrutural extensional durante o paleoproterozóico. Chauvet et al. (1994) propuseram um modelo associando um evento tectonomagmático como causa do soerguimento do embasamento cristalino e o dobramento regional em larga escala das seqüências supracrustais. Alkmim e Marshak (1998) interpretaram essas estruturas como consequência de um cinturão dobrado e com falhas de empurrão, desenvolvido depois de 2.125 Ga, durante o fechamento da bacia de margem passiva. Também concluíram que o evento supracitado foi seguido pelo soerguimento de domos do embasamento contra as rochas supracrustais, em 2.095 Ga, devido a um colapso orogênico.

Durante o ciclo Brasileiro (650 – 500 Ma), empurrões com vergência para oeste foram sobrepostos às estruturas mais antigas, causando inversão, amplificação, translação e rotação das dobras sinclinais e desenvolvendo inversões e estruturas dobradas representadas pelas zonas de cisalhamentos, falhas de rasgamento, zonas de transcorrências e tipos variados de dobras de amplitudes menores (Chemale et al. 1994, Chauvet et al. 1994, Alkmim e Marshak, 1998, Rosière et al. 2001).

O grau metamórfico aumenta progressivamente a partir do fácies xisto verde nas porções oeste e central do Quadrilátero, até o fácies almandina-anfibolito na porção leste. O evento encontra-se evidenciado pelo aumento do tamanho dos grãos de quartzo e a presença de minerais metamórficos característicos que foram descritos (Dorr, 1964). Herz (1978) identificou as isógradas da biotita e estauroлита separando três zonas metamórficas progressivas (clorita, biotita e estauroлита), tendo observado a mudança significativa da hematita para especularita durante o metamorfismo de grau médio e superior. Pires (1995) estudou as isógradas em metalutitos, redefinindo e resultando em três zonas metamórficas: grunerita, cumingtonita-actinolita e tremolita-antofilita. A temperatura de equilíbrio destas zonas aumenta para leste a uma temperatura em torno de 300 °C a 600 °C e a uma pressão estimada de 3 a 5 kbar.

O processo de enriquecimento das Formações Ferríferas Bandadas (BIF) formou os depósitos de minério de ferro em todo o Quadrilátero Ferrífero. Podem ser classificados em depósitos de alto teor e baixo teor, utilizando como base o teor de ferro. O grupo de alto teor apresenta um percentual de ferro total acima de 62% e baixos conteúdos de contaminantes, como SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO e outros elementos menores. A faixa do percentual de ferro dos minérios de baixo teor é de 32% a 62% e quantidades variadas de contaminantes.

Itabiritos são Formações Ferríferas Bandadas, heterogeneamente deformadas, com diferentes graus de metamorfismo e oxidadas. Os corpos de minérios estão distribuídos descontinuamente, em tamanhos que variam de centímetros a centenas de metros de espessuras. Processos múltiplos obliteraram parcialmente ou totalmente a mineralogia, textura e estrutura dos sedimentos originais, dificultando a identificação das estruturas primárias, principalmente nas regiões onde predominaram os esforços de alta tensão. Nos domínios de baixa tensão, encontram-se preservadas várias feições sedimentares e diagenéticas, dentre as quais os mesos e microbandamentos, compactações diferenciais (“pods”) e pisolitos (Rosière et al. 2001).

O bandamento é a principal feição interna dos itabiritos. Dobras apertadas e isoclinais com clivagem de crenulação, bem como estruturas adelgadas e expandidas são observadas nas exposições em campo. As zonas de cisalhamento são restritas, aparecendo paralelas a outras estruturas ou truncando o bandamento. Ribeiro e Zavaglia (1998) descreveram as estruturas “kink-bands” como de colapso, muito comuns em itabiritos intemperizados.

O principal tipo de itabirito do Quadrilátero é o quartzo itabirito, onde as bandas de chert ou jasper foram recristalizadas para quartzo granular. O ferro está presente nos minerais hematita, magnetita ou martita. Os itabiritos anfibólicos consistem de bandas de anfibólios como a grunerita, tremolita, actinolita, cumingtonita e/ou antofilita, alternadas com bandas de óxido de ferro (Rosière et al., 1993).

O mineral hematita é o principal óxido de ferro dos itabiritos, ocorrendo em diferentes formas: martita (hematita pseudomórfica formada posteriormente à magnetita), hematita granular e especularita (Dorr, 1964, 1965; Rosière, 1981, 1983, 2000). A magnetita ocorre também como kenomagnetita, uma variedade deficiente em Fe^{2+} (fases magnéticas metaestáveis entre a composição dos minerais magnetita e maghemita). A magnetita também aparece como relictos em martita e agregados de hematita. Estes óxidos de ferro foram desenvolvidos em várias seqüências durante a evolução complexa do Quadrilátero Ferrífero (Rosière, 1981, 1983 e Rosière et al., 2001). A magnetita é o mais antigo óxido de ferro reconhecido, aparecendo totalmente ou parcialmente martitizada. A hematita granular resulta do processo de martitização progressiva, inversão e recristalização da magnetita. A especularita é proveniente da recristalização de kenomagnetita, martita ou hematita, nos domínios de alta tensão e zonas de cisalhamento (Rosière et al., 2001). A especularita também pode ocorrer em sítios extensionais associadas com quartzo ou carbonatos (Lagoeiro, 1998). A goethita é comum próxima à superfície, comumente associada à gibbsita e caolinita.

O quartzo é o mineral mais comum presente na ganga dos itabiritos, seguido por dolomita e anfibólio, presentes como bandas ou disseminados em locais restritos do Quadrilátero Ferrífero. Os minerais clorita, talco, apatita e outros minerais silicatos, ocorrem em baixas quantidades, exceto nas regiões metamórficas de alto grau, quer seja de contato ou regional (Dorr, 1973). O mineral wavellita é restrito a poucos depósitos do Quadrilátero Ferrífero, sendo a maior concentração na Mina da Jangada (Vale).

A composição mineralógica de um tipo de minério sempre será o aspecto mais relevante a ser levado em consideração na seleção da rota de processo de beneficiamento. Minérios com quartzo liberado podem ser concentrados por métodos gravíticos na fração sinter feed e flotação catiônica reversa na fração pellet feed. Métodos magnéticos diversos também são empregados para a concentração de minério de ferro em ambas as faixas granulométricas. É muito relevante identificar e quantificar os tipos de minerais que predominam nas faixas granulométricas avaliadas para concentração (Silva et al., 2002).

É essencial para o controle do processo industrial a avaliação dos constituintes mineralógicos, porosidade, morfologia, tamanho dos cristais, trama, forma e tipo da superfície das partículas. A conjugação dos parâmetros estruturais, com os granulométricos, físicos, químicos e metalúrgicos, constitui-se em uma técnica eficiente para controle de qualidade dos minérios e aglomerantes, usando os estudos geometalúrgicos (Vieira et al., 1999).

Os minérios hematíticos de alto teor são encontrados sob duas formas: duros e macios, mas também apresentam subtipos. Os minérios hematíticos duros podem ser bandados, maciços, com lineação bem definida, xistosos e também podem ser localmente brechados. Os minérios macios podem ser desestruturados, como os depósitos denominados de “blue dust” (Rosière et al. 1993; Rosière, 2000), foliados ou com lineação bem definida.

Segundo Park (1959), o minério hematítico compacto de alto teor do Quadrilátero Ferrífero possui origem tanto hipogênica quanto supergênica.

Os minérios hematíticos compactos, micáceos e xistosos do Quadrilátero Ferrífero foram gerados durante evento sin-metamórfico compressivo, regime dúctil, na mesma fase da formação da foliação principal e redobramentos. A atividade hidrotermal metassomática produziu os corpos hematíticos compactos em temperaturas estimadas de 400⁰ C (Pires et al., 1998).

Segundo Rosière (1983), os minérios compactos de alto teor do depósito do Pico de Itabirito não mostram nenhuma evidência de substituição metassomática durante os eventos metamórficos (1.8 a 2.2 Ga), mas há evidências de recristalizações dos óxidos de ferro primários: magnetita (martita) e hematita I. Estes minerais são pré-tectônicos, possivelmente diagenéticos. A recristalização ocorreu na primeira fase de deformação, que atuou nos metassedimentos. Os novos minerais recristalizados hematita II e especularita, são orientados ao longo da xistosidade e superfícies cisalhadas.

Estudos químicos e mineralógicos feitos por Varajão et al. (1997) concluíram que os corpos de hematita compacta do Quadrilátero Ferrífero apresentariam a seguinte evolução genética: 1 – sedimentação, em ambiente redutor, de corpos lenticulares de “magnetita compacta” e metamorfismo superimposto; 2 - alteração supergênica, onde as magnetitas são parcial ou totalmente martitizadas, gerando corpos de “martita porosa”. Os núcleos remanescentes dos cristais de magnetita (kenomagnetita e maghemita) são dissolvidos, gerando uma importante porosidade. Nos corpos situados próximos à superfície, os poros podem apresentar-se preenchidos por um plasma goethítico-hematítico, cuja composição química (altos valores de alumínio e titânio) e a proximidade aos cristais de magnetita permite concluir que os plasmas goethítico-hematíticos possuem uma origem supergênica. Assim, a denominação correta do minério “hematita compacta” seria “martita compacta porosa”; e o protominério, “magnetita compacta”.

A hematita existente na Formação Ferrífera do Grupo Itabira está diretamente associada à oxidação da magnetita durante o metamorfismo regional, tendo produzido tipos hematíticos xistosos e micáceos, de acordo com o grau metamórfico e em associação com vários silicatos minerais. Durante o metamorfismo progressivo, a composição original tem controlado a composição da fase fluida. A distribuição das isógradas aparentemente obedece ao gradiente termal, definindo a natureza da assembléia mineral. A superfície termal que corta o Quadrilátero Ferrífero está posicionada paralelamente às isógradas regionais (Pires e Frost, 2004).

A specularita é o resultado da recristalização sintectônica nos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, de maneira que sua proporção relativa está relacionada com o grau de deformação. A relação direta entre o grau de deformação tectônica sofrida pelo minério e o grau de recristalização, desenvolvimento de trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética, reflete variações regionais e locais nas condições de deformação no Quadrilátero Ferrífero (Rosière et al., 1998).

Diferente de outras partes do Quadrilátero Ferrífero, a formação ferrífera das minas de Itabira tem uma mineralogia mais complexa. Os materiais graníticos ocorrem intercalados com bandas de óxidos de ferro e sílica. Uma combinação de técnicas

analíticas, incluindo micro-sonda, difração de raios-x e fluorescência de raios-x, foi aplicada para determinar a mineralogia e a composição química das rochas da formação ferrífera. As camadas ricas em ferro são compostas por magnetita e hematita, principalmente. A goethita foi formada após o óxido de ferro. A mistura de materiais ígneos, formação ferrífera e diferentes teores de MnO, produziu uma extensa variação na composição mineral, incluindo óxidos complexos e hidróxidos contendo Fe, Al, Mn, Mg, Ti, Ca, Na, K, Ba, Li, Be, F, bem como alguns fosfatos (monazita) e silicatos minerais, tais como feldspatos e micas (Lagoeiro et al., 2004).

Estudos sistemáticos em amostras representativas do Quadrilátero Ferrífero, levaram a estabelecer um relacionamento entre os processos geológicos e o crescimento mineral. As magnetitas granulares e os agregados de hematitas formam as assembléias mineralógicas mais antigas. A deformação mais intensa e penetrativa, denominada de D1, promoveu a transformação de agregados de magnetita e a cristalização de novos cristais de hematita tabular. A recristalização dos agregados originais de hematita produziu agregados de grãos de hematita tabular. O processo deformacional e metamórfico D2 foi menos severo, sendo a recristalização mineral manifestada localmente. Os processos de intemperismo promoveram profundas modificações na mineralogia e textura, geradas pelos processos anteriores (Lagoeiro et al., 2004).

Em termos genéticos os minérios macios podem ser explicados pela concentração residual de óxidos de ferro, pela lixiviação dos elementos químicos contaminantes durante os processos de alteração supergênica (Dorr, 1964; Eichler, 1967; Melfi et al., 1976; Viel et al., 1987; Ramanaidou, 1989; Ramanaidou et al., 1996). Também podem ser explicados como uma consequência do metassomatismo incompleto das Formações Ferríferas Bandadas seguido pelo intemperismo, sendo uma teoria sugerida por Dorr (1965). Os minérios com consistência dura podem ser considerados como resultado de uma substituição ou lixiviação dos minerais de ganga, com ocorrência na fase metamórfica e deformacional (Dorr, 1965). Há muitos questionamentos na literatura a respeito desta gênese da mineralização mais compacta (Rosière, 1981; Rosière e Rios, 2002).

Segundo Ribeiro (2003) a alteração dos itabiritos silicosos e dolomíticos no Quadrilátero ferrífero ocorre com perda significativa de massa e consequente redução de volume da rocha residual. Importante modificação textural da matriz rochosa alterada é provocada por colapsos gravimétricos que se desenvolvem durante o intemperismo. As zonas mais profundas de alteração dos itabiritos associam-se com os grandes depósitos supergênicos de alto teor, que têm em comum as feições geomorfológicas geradas por colapsos e subsidências da região alterada, formando pequenas depressões. Essas depressões, na Mina do Pico de Itabirito, estão entre as altitudes de 1300 e 1444 m acima do nível do mar, estando preenchidas por depósitos argilosos intercalados por níveis conglomeráticos sobre minério de ferro friável de alto teor (itabiritos ricos e minérios hematíticos de alto teor). A geometria do bandamento e das “kink bands” na região norte da Mina do Pico de Itabirito é compatível com a deformação do tipo coaxial, cujo eixo de encurtamento é vertical e paralelo ao eixo compressivo do elipsóide de tensões. O eixo de menor tensão ou alívio é horizontal e perpendicular à direção das camadas. O padrão em leque do bandamento na face norte da Mina do Pico de itabirito é provocado por colapsos laterais da Formação Ferrífera Bandada em direção às zonas deprimidas, devido aos abatimentos das unidades carbonáticas. Esses colapsos fazem com que a Formação Cauê tenha uma espessura aflorante, na zona alterada, provavelmente superior à espessura real da camada sã. Esse comportamento foi verificado no experimento com meios granulares compostos por arroz e açúcar: a banda interna de arroz deforma-se em leque à medida que as bandas laterais de açúcar são dissolvidas pela água.

A Serra do Carajás é formada por duas cadeias de montanhas, onde predominam rochas vulcânicas e Formação Ferrífera Bandada pertencentes ao Grupo Grão Pará. Nas áreas rebaixadas predominam rochas granito-gnáissicas, metavulcânicas e granitos intrusivos do Complexo Xingu (Gibbs e Wirth, 1990). As rochas vulcânicas da parte inferior do Grupo Grão Pará são concordantes com as formações ferríferas, tendo sido datadas em 2.75 Ga (Wirth et al., 1986). O Grupo Grão Pará é recoberto, em discordância erosiva, por rochas sedimentares mais antigas que 1.8 Ga, sendo a idade do Granito Carajás, que é intrusivo nesta seqüência sedimentar.

A Formação Carajás é composta por Formação Ferrífera Bandada, jaspilitos, com teores de ferro total variando de 35% a 49%. As regiões enriquecidas pelos processos supergênicos, apresentam teores de 66% de ferro. Segundo Gibbs e Wirth (1990), o jaspilito pode ter perdido entre 39% e 50% da massa original durante os processos de enriquecimento supergênicos.

As lagoas presentes na Serra dos Carajás estão associadas aos grandes depósitos de minério de ferro de alto teor, havendo zonas profundas de enriquecimento, chegando a 400 metros de profundidade. Sobreposto à região mais enriquecida, encontra-se uma depressão preenchida por 50 metros de depósitos argilosos lacustres e materiais rolados, comprovando a redução de volume ocasionada pelo intemperismo (Ribeiro, 2003).

Guedes et al. (2002) definiram ocorrências de Formação Ferrífera bandada dolomítica na Província de minério de ferro de Carajás, indicando a presença de hidrotermalismo, pela dolomitização seguida de recristalização da magnetita. Esse hidrotermalismo representa importante etapa intermediária na formação dos grandes depósitos hematíticos de alto teor da Província de Carajás.

Morris (1985) e Harmsworth et al. (1990), consideram que o enriquecimento supergênico da Formação Ferrífera Bandada da Província Ferrífera de Hamersley, ocorreu no proterozóico, em um período pré-metamórfico e outro mais recente, no cenozóico. A Província Hamersley pertence ao bloco de Pilbara, situando-se na região NW da Austrália. O Grupo Hamersley, com idade de 2.5 Ga e espessura de 2500 metros, é composto por uma seqüência de Formação Ferrífera Bandada, dolomitos, folhelos químicos, piroclásticos e vulcânicas ácidas, seccionados por diques e sills de doleritos. Grandes concentrações econômicas de alto teor de ferro estão concentradas nas Formações Brockman e Marra Mamba.

Segundo Taylor et al. (2001), a Província de minério de ferro de Hamersley contém corpos de minério hematítico de alta pureza, de idade proterozóica inferior. Novas evidências indicam que os corpos de minério são controlados estruturalmente, situados

ao longo de velhos sistemas de falhas normais, formados durante o maior soerguimento ocorrido no período proterozóico.

A Formação Marra Mamba é constituída por Formação Ferrífera Bandada, chert, carbonatos e lentes de folhelos intercalados, concentrando a maioria dos depósitos de ferro. Em termos estratigráficos, constitui a unidade basal do grupo. As principais jazidas de minério de alto teor fazem parte da Formação Brockman, com espessura variável, sendo de 500 metros em Paraburdoo a 620 metros em Mt. Tom Price.

Os corpos hematíticos compactos teriam sido gerados por processos metamórficos no pré-cambriano, após enriquecimento supergênico anterior.

As falhas e fraturas teriam permitido o acesso da água subterrânea a níveis profundos, lixiviando a sílica e outros minerais de ganga, substituindo-os, parcialmente, por hidróxidos de ferro. O processo é acompanhado pelo adelgaçamento da Formação Ferrífera Bandada, sendo o ferro originado da superfície erodida, concentrado nas zonas mais profundas e gerado o minério de alto teor.

Segundo Harmsworth et al. (1990), os minérios de ferro hematíticos sem goethita, de Mt. Whaleback e Mt. Tom Price, foram gerados no pré-cambriano, há 2.0 Ga, por substituição supergênica da Formação Ferrífera Bandada, durante a exposição de parte da plataforma de Hamersley. Esta plataforma foi soterrada há 1.85 Ga e os depósitos gerados por enriquecimento supergênico foram submetidos a um metamorfismo de baixo grau, tendo havido substituição da matriz goethítica por hematita secundária, com textura “micro platy”. O minério pulverulento foi formado onde a lixiviação promoveu a desintegração do minério. O minério compacto foi gerado nas áreas onde a passagem da goethita para hematita foi mais eficiente, durante os eventos metamórficos. Os depósitos mais recentes tem alto conteúdo de goethita, tendo sido formados nas condições atuais de intemperismo e sobre as porções não metamorfizadas da Formação Ferrífera Bandada. Estão associados com o sistema mesozóico de drenagens, variando muito em termos de consistência, diretamente relacionados à composição original, controle estrutural, topografia e condições específicas de lixiviação pela água.

Os autores acima citados separam os depósitos de martita-goethita em dois sub-grupos: martita-goethita da Formação Brockman e martita-goethita ocre, da Formação Marra Mamba. A Formação Brockman apresenta maior proporção de fosfatos e menor percentual de carbonatos e silicatos, relacionada à Formação Marra Mamba. O depósito de Marandoo está situado na Formação Marra Mamba, tendo sido formado por enriquecimento supergênico recente, com média de 30 metros de profundidade e grandes extensões laterais.

Clarck e Schmidt (1986) e Schmidt e Clarck (1994), utilizando informações paleomagnéticas, sugerem que um evento termo-químico possa ter afetado a Província de Hamersley, no Paleoproterozóico, formando a hematita placóide hipogênica. Um processo hidrotermal, associado a eventos tectônicos, teria permitido a passagem dos fluídos, lixiviando a sílica e depositando o ferro dissolvido. Powell et al. (1999) e Barley et al. (1999) seguem esse modelo genético.

Mineralização com alto teor de ferro (>65%) nos depósitos situados ao norte da Província de Hamersley, Austrália, ocorrem na direção E-W, no interior da Formação Ferrífera Bandada do proterozóico inferior, consistindo de martita na forma microplacóide. Três zonas de alteração hipogênica entre a Formação Ferrífera Bandada não mineralizada e o minério de ferro de alto teor são observadas: 1) silicato de ferro com magnetita e siderita, em zona distal; 2) hematita, ankerita e hematita, em zona intermediária, e 3) martita-microplacóide, hematita-apatita, em zona de alteração proximal. O zoneamento mineralógico foi ocasionado por inclusões fluídas (Thorne et al., 2004).

Os depósitos de Sishen, situados na África do Sul, são constituídos por rochas carbonáticas do Sub-grupo Campbellrand e formações ferríferas do Sub-grupo Asbesheuwels, com mergulhos menores que 10^0 , do Supergrupo Transvaal. Os corpos de minério da Formação Manganore representam uma zona oxidada, com magnetita e siderita primárias. O enriquecimento secundário de hematita está registrado nas bandas porosas de chert e minerais lamelares de hematita (Schalkwyk e Beukes, 1986). Os

autores classificam o minério da região de Sishen em três tipos distintos: o minério laminado caracteriza-se pela alternância de bandas maciças e porosas de hematita, com 2 a 15 mm de espessura; o minério compacto é formado por agregado fino a maciço de hematita lamelar e o minério brechado é formado por dois tipos de brecha hematítica, geradas durante a deposição sedimentar (Beukes et al., 2002). A parte inferior do conglomerado Doorfontein é lenticular, ocorrendo intercalações argilosas, sendo a porção inferior mais rica, com blocos de minério hematítico, reduzindo nos níveis superiores.

Beukes et al. (2002) reforçam o modelo supergênico para as mineralizações ferríferas de Sishen, havendo uma discordância regional sobre a Bacia do Transvaal, definida por um perfil laterítico ferruginoso. O intemperismo ocorreu entre 2.18 a 2.2 Ga, acompanhando um período de soerguimentos e dobramentos do Supergrupo Transvaal. Onde a superfície de discordância corta a Formação Ferrífera Bandada, foram desenvolvidos os corpos hematíticos de alto teor.

3.2 – Geologia local

O projeto de pesquisa tecnológica de produtos granulados de minério de ferro abrange, parcialmente, as minas do Sistema Sul da Vale, atualmente em operação. Serão feitas descrições geológicas e mineralógicas sucintas dos tipos de minérios, objetivando estabelecer comparações entre as minas objeto de estudo (figura 3.5).

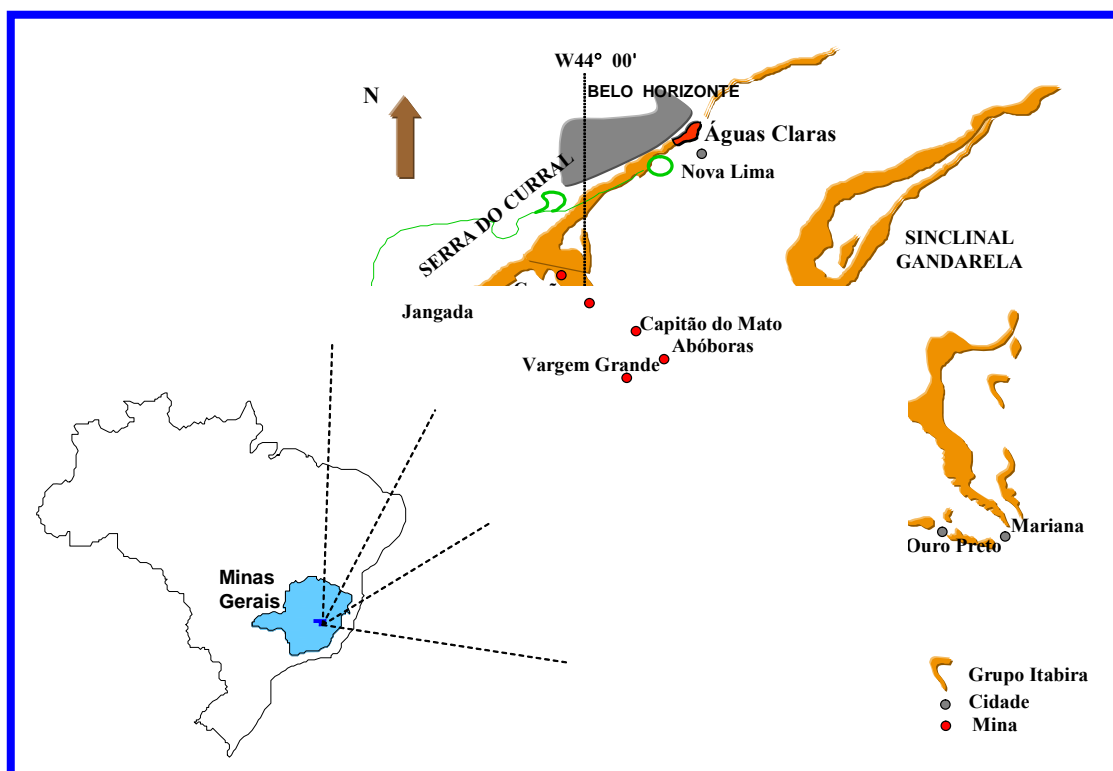


Figura 3.5 – Mapa de localização das minas do Sistema Sul da CVRD, que fazem parte do trabalho. As Minas de Águas Claras e Mutuca estão exauridas (figura modificada de Dorr, 1969).

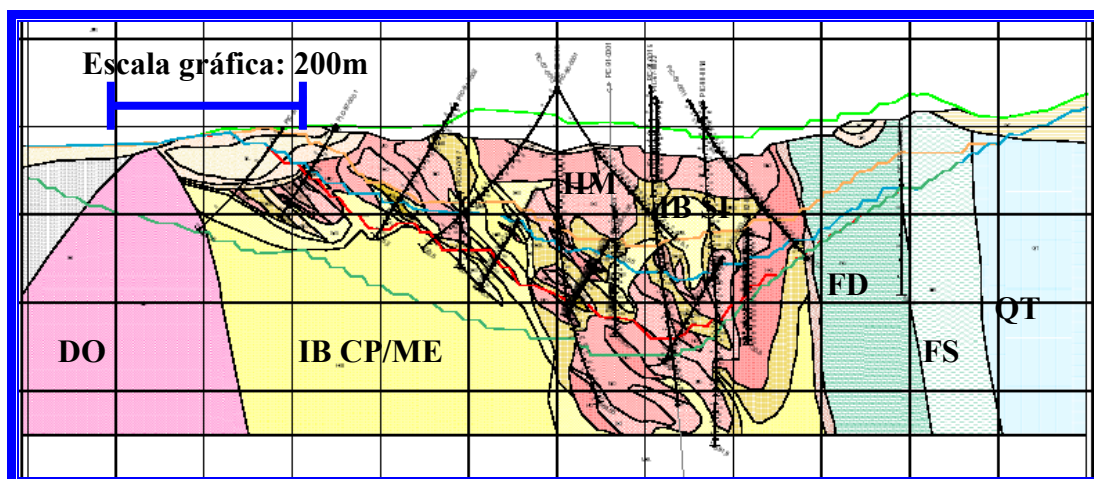
3.2.1 – Minas do Pico, Sapecado e Galinheiro

Os depósitos do Pico, Sapecado e Galinheiro pertencem a uma única direção contínua N-S a N45E, no eixo leste do Sinclinal Moeda, separadas por falhas transversais. A Formação Cauê apresenta uma espessura aparente de 700 metros, com forte variação dos mergulhos das rochas, sendo de 20 a 85° para SE ou NW.

A Mina do Pico é o mais importante depósito na área, com corpos de minério hematítico no formato de lentes com larguras variando de métricas a centenas de metros e extensões de 100 a 1000 metros (figura 3.6). Há dois tipos distintos de minério de ferro na Mina do Pico: alto teor (>64% Fe) e itabiritos ricos, com baixa alumina (52% < Fe < 64%), ambos encaixados em itabiritos silicosos pobres, de consistência média, compacta e friável. A geometria dos corpos de minérios compactos é

parcialmente controlada pelo acamamento que apresenta dobras em pequena escala, com caimento dos eixos de E para NE. O maior corpo compacto ocorre como uma lente vertical, apresentando um bandamento definido pela alternância entre as camadas compactas e porosas. Uma foliação tectônica é fracamente desenvolvida, com alguma especularita orientada em zonas de cisalhamento. Minério brechado ocorre na base do Pico, composto por fragmentos de minério compacto de vários centímetros em uma matriz fina. Dobras e falhas desenvolvidas durante a orogenia do Brasileiro, rotacionaram e soergueram os corpos compactos, desenvolvendo “kink bands” e fraturas que foram responsáveis pela geometria final do depósito e permitiram o intemperismo profundo dos itabiritos, gerando os corpos de hematitas macias e atuando como barreira hidro-geológica, gerando hematitas macias até 400 metros de profundidade. Matações de itabirito e minério compacto, cimentados por argilas, quartzo e hematita ocorrem na base de pequenas bacias, de idade paleocena a eocena, irregularmente distribuídas ao longo da seqüência da Mina do Pico.

Em termos mineralógicos, a martita predomina nos corpos compactos de alto teor, com relictos de magnetita, na Mina do Pico. A hematita ocorre como cristais xenomórficos nos minérios martíticos. Nos minérios hematíticos, a hematita aparece como granular e com formato lobular, com dimensões entre 0,01 a 0,1 mm. A especularita ocorre em várias proporções nos minérios martíticos e hematíticos. Os itabiritos ricos apresentam uma trama bandada, composta por hematita granular e martita, também ocorrendo em uma trama foliada, rica em especularita placóide, que define uma xistosidade que pode transpor o bandamento. O quartzo ocorre na forma granoblástica, comumente associado aos óxidos de ferro nas bandas.



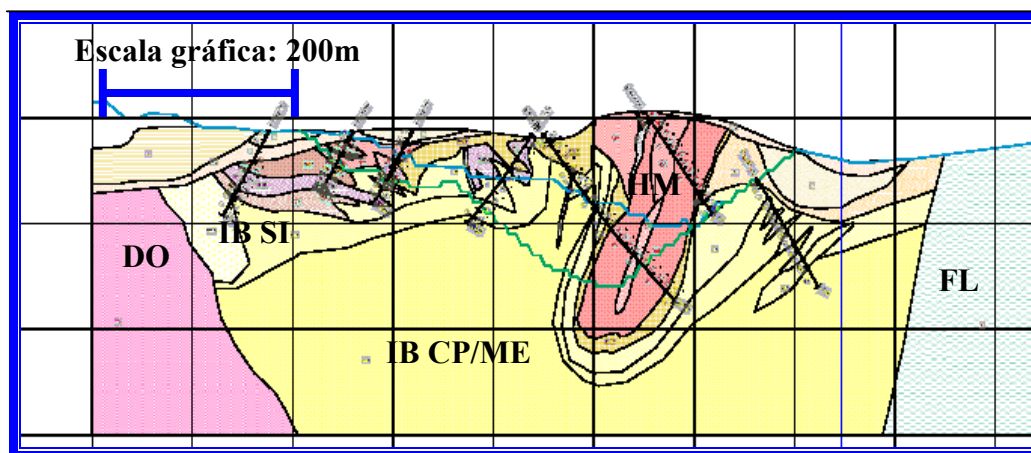
Legenda: HM – Minério hematítico; IB SI – Minério itabirítico silicoso friável;
 IB CP/ME – Itabirito compacto/médio; FD – Filito dolomítico;
 FS – Filito sericítico; DO – Dolomito; QT - Quartzito

Figura 3.6 – Seção geológica típica da Mina do Pico, com base em furos de sonda.

A Mina do Sapecado está situada imediatamente ao sul do Pico, sendo o minério de alto teor composto por lentes métricas a decamétricas de minério hematítico compacto e lentes hematíticas macias com espessuras irregulares, gradacionais a itabiritos ricos e silicosos (figura 3.7). Na porção sul, ocorrem diques máficos parcialmente concordantes com a foliação e na região norte da mina, os diques máficos são discordantes da principal estrutura. Na região oeste da mina, ocorrem lentes métricas de itabiritos manganésíferos, derivados de carbonatos de manganês. Localmente são denominados de ferro-manganês, pelos teores acima de 10% de óxidos de manganês.

A mineralogia dos minérios compactos da Mina do Sapecado, é composta por hematita granular fina (0,005 – 0,03 mm) e hematita lobular (maiores que 0,06 mm), que ocorrem em proporções variadas. A hematita granular predomina em percentuais acima de 70%. A hematita cresce sobre agregados martínicos (<10%) com alguns relictos de kenomagnetita (usualmente <5%). O tamanho dos cristais individuais de martita varia de 0,07 – 0,1 mm. A specularita e hematita tabular (<10%), com tamanhos acima de de 0,1 mm, crescem nos interstícios, junto com quartzo, ou em domínios foliados (dobras apertadas e zonas de cisalhamento). Os itabiritos ricos são similares aos da Mina do

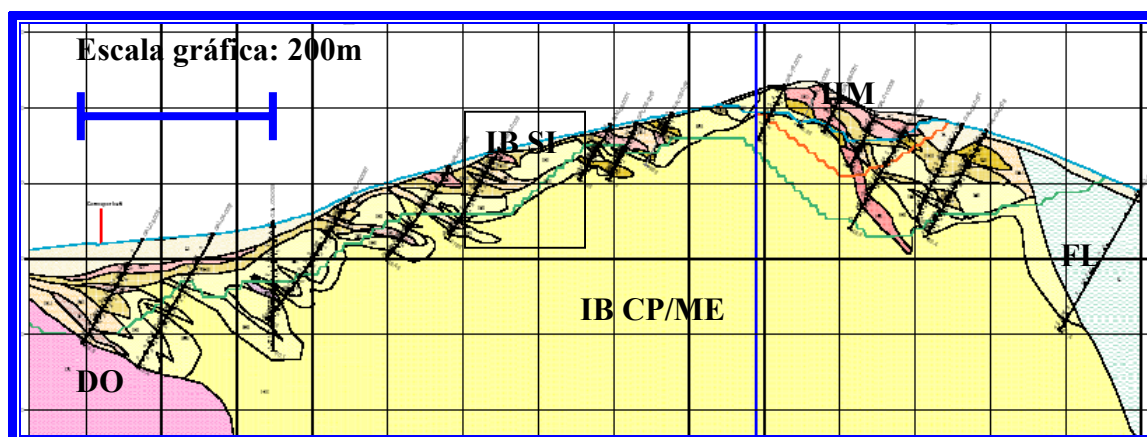
Pico, com maior quantidade de itabiritos dolomíticos, onde o mineral principal é a martita.



Legenda: HM – Minério hematítico; IB SI – Minério itabirítico silicoso friável;
IB CP/ME – Itabirito compacto/médio; FL – Filito; DO – Dolomito

Figura 3.7 – Seção geológica típica da Mina do Sapecado, com base em furos de sonda.

A Mina do Galinheiro está situada cerca de 4 km ao norte da Mina do Pico, sendo composta por lentes métricas de minérios hematíticos compactos de alto teor e, subordinadamente, lentes irregulares de hematititos macios, gradacionais a itabiritos ricos. Os itabiritos ricos encontram-se associados a itabiritos silicosos friáveis, médios e compactos, com passagens gradacionais e abruptas (figura 3.8).



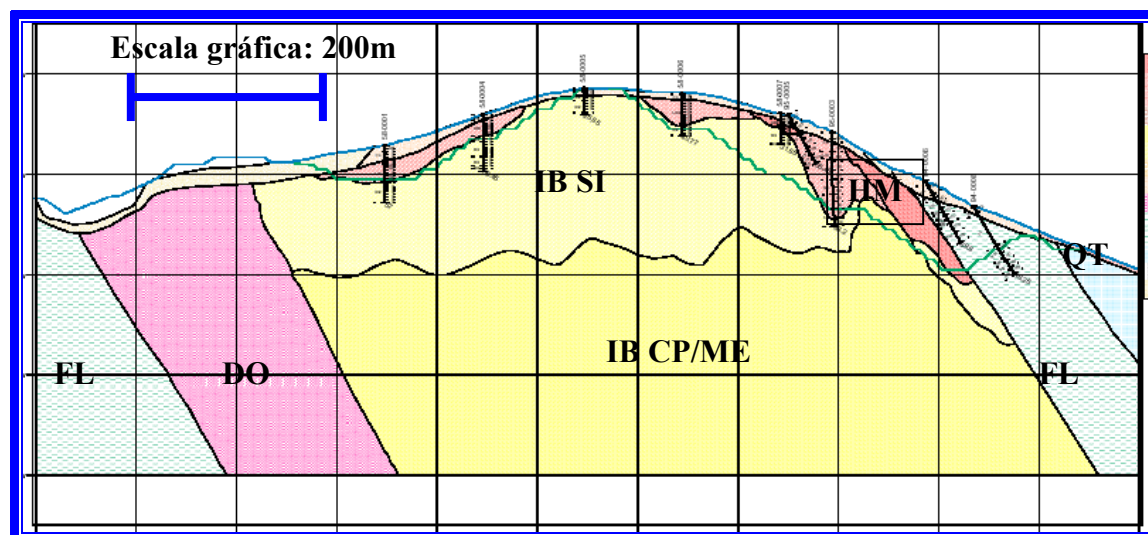
Legenda: HM – Minério hematítico; IB SI – Minério itabirítico silicoso friável;
IB CP/ME – Itabirito compacto/médio; FL – Filito; DO – Dolomito;

Figura 3.8 – Seção geológica típica da Mina do Galinheiro, com base em furos de sonda.

Os minérios compactos de alto teor são formados por hematita, martita e relictos de magnetita. Os cristais de martita são idiomórficos, com dimensões de 0,005 a 0,1 mm, ocorrendo individualmente ou na forma de agregados, compondo menos de 10% dos óxidos de ferro. Sobre esta fábrica, encontram-se hematita granular e lobular, com cristais variando de 0,01 a 0,05 mm, ocorrendo em proporções variadas, obliterando parcial ou totalmente as estruturas martíticas antigas e resultando em um domínio de minério compacto. Nos poros e interstícios ocorrem hematita tabular e especularita, com comprimento variando de 0,01 a 0,05 mm. Em zonas de cisalhamentos, a especularita é individualizada em tamanhos acima de 0,1 mm de comprimento.

3.2.2 – Mina de Abóboras

O depósito de Abóboras tem uma direção geral N30W, mergulho médio de 45NE, extensão de 600 metros e uma largura média de 150 metros. O depósito compreende lentes descontínuas de minério hematítico compacto e minério hematítico macio, gradando lateralmente e em profundidade, para itabiritos ricos (figura 3.9).



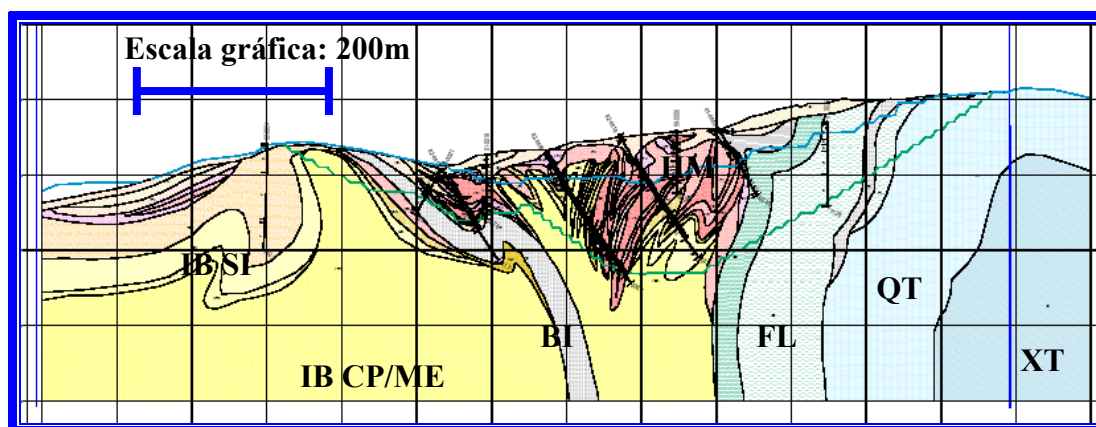
Legenda: HM – Minério hematítico; IB SI – Minério itabirítico silicoso friável;
 IB CP/ME – Itabirito compacto/médio; FL – Filito; DO – Dolomito;
 QT - Quartzito

Figura 3.9 – Seção geológica típica da Mina de Abóboras, com base em furos de sonda.

Os minérios compactos são compostos por hematita granular (80%), com tamanhos variando de 0,002 a 0,05 mm. Hematita lobular finamente granulada encontra-se em percentuais de 20%. São raros os relictos de martita e a especularita ocorre em veios. A porosidade média é baixa (5%), com poros intersticiais muito finos.

3.2.3 – Mina de Capitão do Mato

O corpo de minério de Capitão do Mato está localizado no eixo leste do Sinclinal Moeda, em torno de 3 km a sudeste da Mina do Tamanduá. A extensão do depósito é de aproximadamente 2500 metros, na direção N70⁰W. A largura média é de 350 a 400 metros e 250 metros de profundidade. É constituída por lentes dobradas e corpos descontínuos com formato irregular de minério hematítico compacto. São comuns as lentes de minério macio de origem supergênica, intercaladas com itabiritos ricos. As dobras de segunda ordem controlam a forma do depósito. Na porção NW, o corpo de minério é sub-vertical e estreito, alargando acima de 300 metros na porção SE. Rochas meta-máficas sintectônicas ocorrem na borda sul do corpo de minério, com mergulho NW e direção paralela ao contato entre o filito das Formações Batatal e Cauê. Os contatos litológicos são usualmente falhados, com brechação localizada (figura 3.10).



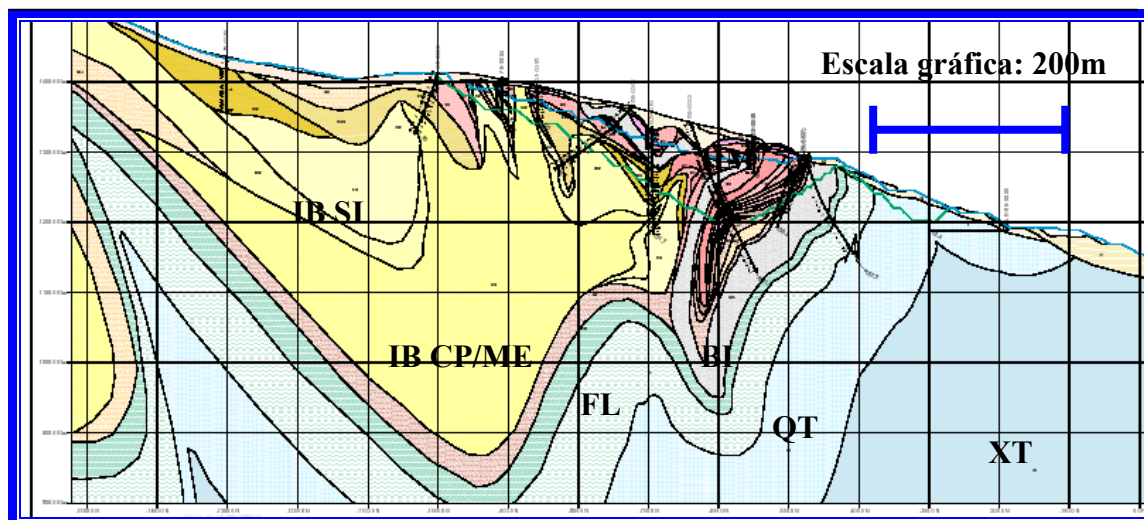
Legenda: HM – Minério hematítico; IB SI – Minério itabirítico silicoso friável;
 IB CP/ME – Itabirito compacto/médio; FL – Filito; DO – Dolomito;
 QT – Quartzito; BI – Básica; XT – Xisto

Figura 3.10 – Seção geológica típica da Mina de Capitão do Mato, com base em furos de sonda.

O minério compacto é composto por cristais de hematita granular (em torno de 80%), desenvolvidos sobre agregados martíticos (10%), parcialmente arredondados pela especularita, que cresceu nos interstícios (10%). Os cristais de hematita granular são muito finos (0,01 – 0,03 mm). A xistosidade é caracterizada por hematita tabular e especularita, com 0,02 a 0,05 mm (70 a 80%), envolvendo agregados porfiroclásticos de hematita granular (20%). O mineral kenomagnetita porfiroclástica parcialmente martitizada, é uma feição comum, com cristais acima de 0,15 mm de diâmetro.

3.2.4 – Mina do Tamanduá

O depósito de Tamanduá está localizado no Sinclinal Tamanduá, que é uma dobra de segunda ordem do Sinclinal Moeda, no bloco leste da Falha da Mutuca. O corpo de minério é cortado por duas falhas, preenchidas por diques de composição intermediária a básica, que limita e dividem o corpo de minério em três domínios. Os mais ricos e mais espessos corpos de minérios de alto teor estão localizados no domínio central. O corpo de minério do Tamanduá é composto por minério macio e, secundariamente, por lentes de minério hematítico compacto. A direção é NW-SE, comprimento de 2800 metros, largura aparente de 400 metros e profundidade máxima de 500 metros. Os corpos de minérios mais duros, podem ser compactos, porosos e xistosos, sendo controlados por dobras acilíndricas, com caimento para SE, envolvidas por minério macio e itabiritos ricos. O corpo de minério é circundado por litologias impermeáveis como filitos, diques intermediários a básicos, os quais favoreceram o enriquecimento supergênico (figura 3.11).



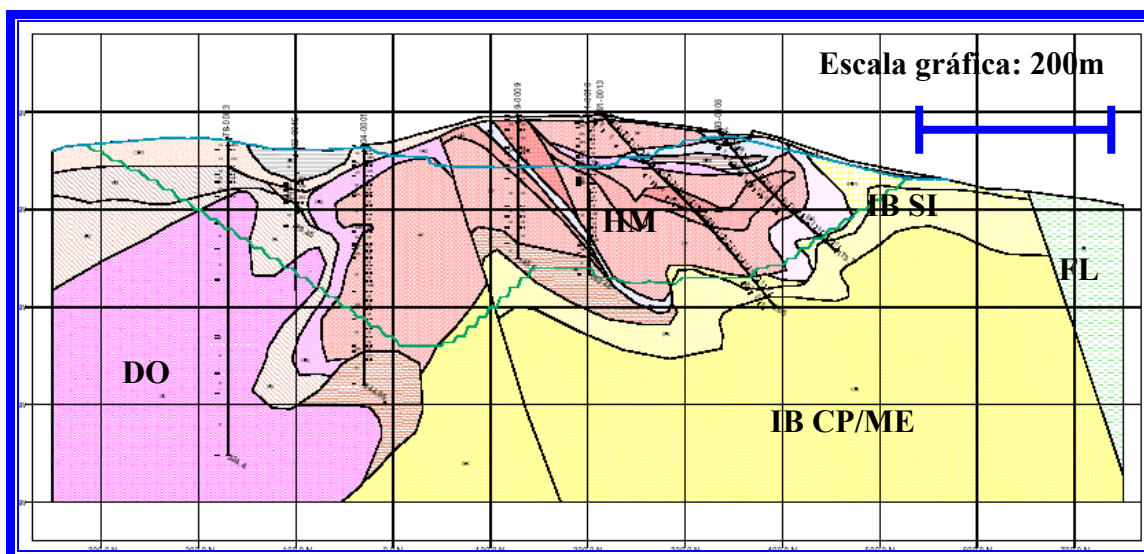
Legenda: HM – Minério hematítico; IB SI – Minério itabirítico silicoso friável;
 IB CP/ME – Itabirito compacto/médio; FL – Filito; DO – Dolomito;
 QT – Quartzito; BI – Básica; XT - Xisto

Figura 3.11 – Seção geológica típica da Mina do Tamanduá, com base em furos de sonda.

Nos corpos de minério maciço predomina uma fina fábrica granoblástica porosa, com hematita lobular, granular e martita. O bandamento é definido pela alternância de porosidade, tamanho dos cristais e mineralogia dos óxidos de ferro. São raros os cristais de kenomagnetita, hematita tabular e especularita. A porosidade varia de 15 a 25%.

3.2.5 – Mina de Capão Xavier

A Mina de Capão Xavier está localizada no eixo leste do Sinclinal da Moeda, no bloco oeste da Falha da Mutuca. O corpo de minério de alto teor tem 800 metros de comprimento e 400 metros de largura. No domínio sul o corpo de minério tem direção E-W e mergulho de 70°S, chegando a 260 metros de profundidade. No domínio norte, o acamamento é sub-horizontal, com profundidade média de 100 metros. Predominam corpos de minérios hematíticos macios, intercalados com itabiritos argilosos, gradando para itabiritos dolomíticos nas zonas mais profundas. Na porção oeste da mina, são comuns as intercalações de itabiritos silicosos, ricos e corpos hematíticos silicosos e aluminosos (figura 3.12).



Legenda: HM – Minério hematítico; IB SI – Minério itabirítico silicoso friável;
 IB CP/ME – Itabirito compacto/médio; FL – Filito; DO – Dolomito;
Figura 3.12 – Seção geológica típica da Mina de Capão Xavier, com base em furos de sonda.

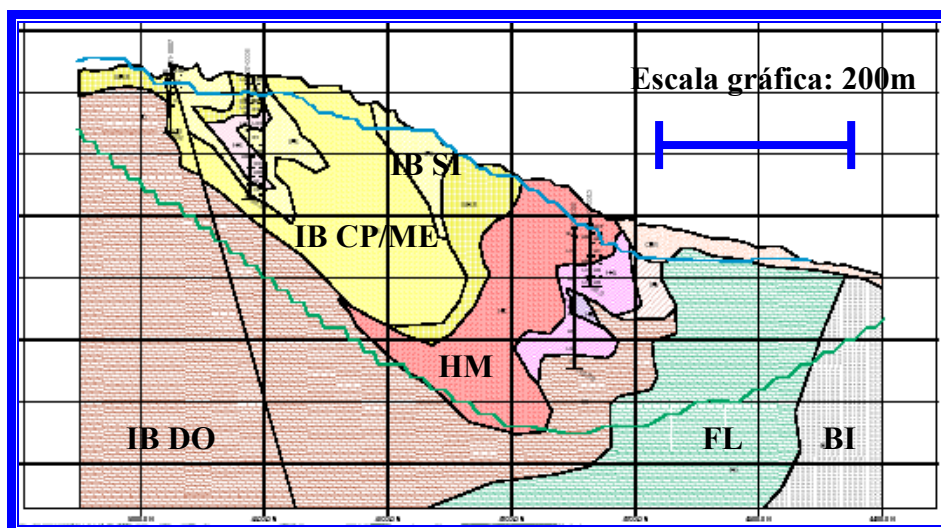
3.2.6 – Mina da Jangada

O Complexo mineiro da Jangada compreende três Minas: Samambaia, Água Santa e Jangada, distante 30 km a sudoeste de Belo Horizonte. A direção dos depósitos é aproximadamente E-W (média de 353/79). O corpo de minério Samambaia está localizado na extremidade oeste, compreendendo lentes de hematitas compactas fraturadas, com espessura de 30 metros, circundadas por itabiritos silicosos friáveis, médios/compactos e itabiritos friáveis ricos.

Os corpos de minério dos depósitos de Jangada e Água Santa estão localizados na zona de charneira do eixo sul de uma dobra sinforme. Corpos de minérios compactos estão intercalados com minérios macios, com espessura máxima de 200 metros e extensão de 1000 metros. O minério duro encontra-se na forma maciça, bandada, ou na forma brechada. Os itabiritos dolomíticos são comuns na parte inferior dos depósitos, gradando para filitos, na parte inferior e itabiritos silicosos, na parte superior. Os

itabiritos silicosos dominam o núcleo da estrutura sinformal, variando de friáveis a compactos (figura 3.13).

Em termos mineralógicos, os minerais hematíticos, martita e kenomagnetita, com presença local de limonita e goethita, predominam nos minérios de alto teor da Jangada e Água Santa. A especularita e hematita tabular ocorrem localmente. As fraturas podem estar preenchidas com wavellita. O minério é usualmente compacto, ou apresenta um fraco bandamento. Nos minérios maciços duros, o bandamento é definido pela alternância de camadas maciças e porosas e a porosidade é de aproximadamente 10%. No depósito de Jangada a hematita lobular é o principal componente (acima de 50%), sempre como cristais finos (0,02 – 0,05 mm). A hematita granular ocorre em torno de 30%, com cristais de tamanho médio semelhante à lobular. Em Água Santa o minério apresenta um grau de recristalização mais alto, com 40 – 80% de hematita granular, mas sempre sob a forma de finos cristais (<0,05 mm). A hematita tabular aparece em baixas proporções (<10%). O minério brechado é constituído por agregados de martita, relictos de magnetita e a matriz são constituídas por cristais submilimétricos de kenomagnetita/martita e algum quartzo. A goethita é comum e a porosidade varia de 5 a 20%.



Legenda: HM – Minério hematítico; IB SI – Minério itabirítico silicoso friável;
 IB CP/ME – Itabirito compacto/médio; FL – Filito; IB DO – Itabirito
 dolomítico; BI - Básica

Figura 3.13 – Seção geológica típica da Mina da Jangada, com base em furos de sonda.

3.3 - Normas internacionais para os ensaios metalúrgicos dos produtos granulados de minério de ferro

Tem sido observada uma evolução crescente no sentido de normatizar os ensaios metalúrgicos e as normas ISO (International Organization for Standardization), elaboradas através de subcomitês SC 03 (alto-forno), SC 05 (redução direta) e TC 102, devem ser escolhidas como procedimentos padronizados para uma melhor representatividade dos testes metalúrgicos. Os ensaios resultam em índices que classificam os produtos avaliados relativamente e o controle pode ser feito em toda a cadeia produtiva, desde a lavra até o embarque do produto.

A norma ISO 11257 (1998) descreve um método de avaliação do comportamento da desintegração e metalização de produtos de minério de ferro tipo “pellets” e granulados destinados aos processos de redução direta, utilizando gás reformado. O grau de metalização reflete a facilidade com que o produto perde oxigênio para o gás redutor, sendo que quanto maior o índice, melhor para o processo, aumentando a produtividade, reduzindo o consumo de coque (“coke rate”) e economizando energia na aciaria. O grau de metalização é calculado pela seguinte fórmula: $GM=(w_0/w_t)*100$, onde w_0 é o conteúdo de ferro metálico, expresso como um percentual da massa, da porção reduzida do teste; w_t é o conteúdo de ferro total, expresso como um percentual da massa, da porção reduzida do teste. A avaliação da desintegração no processo de redução direta mede a resistência do produto na geração de finos quando este é submetido à redução dentro do reator. A hematita (forma hexagonal) é reduzida à magnetita (forma cúbica), a uma temperatura de 375 a 425 °C. Esta mudança provoca uma expansão de volume da ordem de 20%, acarretando o enfraquecimento e a geração de finos, influenciando na permeabilidade do leito dentro do reator.

São detalhados a seguir os ensaios Midrex Linder (MLT), onde são calculados os finos gerados e o grau de metalização:

Objetivo: Determinar o grau de metalização e o índice de finos gerados sob condições que se assemelham ao processo de redução direta com gás reformado.

Aplicação: Processo de redução direta tipo Midrex.

Norma: ISO 11257: 1998.

Produto avaliado: Pelota / Granulado.

Massa (g): 500,0g +/- 1 partícula para cada porção teste.

Faixa granulométrica (mm): Pelota: 50% (-16,0; +2,5) + 50%(-12,5; +10,0)
Granulado: 50% (-20,0; +16,0) + 50%(-16,0;+10,0).

Ensaio: Mínimo de 2 porções teste.

Equipamentos: Forno elétrico horizontal Linder; retorta sem aletas de diâmetro interno útil igual a 130,0 +/- 1mm e comprimento útil de 200mm.

Condições: Temperatura: 760 +/- 5°C; rotação: 10 rpm; Aquecimento: 10 NL/min de N₂ (dentro de 90min); Estabilização: 13 NL/min de N₂ por 30min; Redução: 13 NL/min (55% H₂, 36% CO, 5% CO₂, 4% CH₄) por 300min; Resfriamento: 10 NL/min de N₂; Separar o carbono livre após redução e enviar amostra metalizada após o teste para determinação de FG e GM (análise química).

Peneiramento malhas (mm): Antes: Retirada da faixa, **Depois:** 10,0mm (alívio) e 3,13mm.

Expressão dos resultados: $FG = RDI_{DR} = (m_0 - (m_1 + m_2))/m_0 \times 100$, Onde: m_0 = massa da amostra reduzida (g); m_1 = massa da porção teste reduzida retida na peneira de 10,0mm (g); m_2 = massa da porção teste reduzida retida na peneira de 3,15mm (g); **FG** = finos gerados (5 -3,15mm) (resultado com uma casa decimal). $GM = Fe_m / Fe_T \times 100$, onde: Fe_m = % de ferro metálico da amostra reduzida. Fe_T = % de ferro total da amostra reduzida. **GM** = grau de metalização (%) (resultado com uma casa decimal).

Tolerância permissível: diferença entre duas porções-teste $\leq r$; $FG = RDI_{DR}$: $r = 0,86 + 0,20 \times (RDI_{DR})_{médio}$; GM : $r = 7,22 - 0,06 \times (GM)_{médio}$.

Índices de referência: $GM \geq 90\%$ (granulado); $FG \leq 10\%$ (granulado).

Tempo (h): 25,9.

Custo (US\$): 278,16.

A norma ISO N170 E (1996) descreve um método para avaliar o enxofre liberado por produtos de minérios de ferro naturais ou aglomerado, durante o processo de redução direta. Avalia a quantidade de enxofre liberado pelo produto no gás redutor. A liberação de enxofre, específica para reatores de redução direta com reforma de gás, provoca

contaminação (envenenamento) do catalisador do reformador, prejudicando indiretamente a produtividade.

A seguir o detalhamento do ensaio de liberação de enxofre durante a Redução (LS):

Objetivo: Determinar o enxofre liberado durante a redução direta.

Aplicação: Processo de redução direta tipo Midrex.

Norma: Metodologia IAS (grupo de estudo ISO).

Produto avaliado: Pelota / Granulado.

Massa (g): 500,0g +/- 1 partícula para cada porção teste.

Faixa granulométrica (mm): pelota: (-12,5;+10,0) granulado: (-25,0;+22,4).

Ensaio: Mínimo de 2 porções teste.

Equipamentos: Forno elétrico vertical; Retorta de diâmetro interno igual a 75,0 +/- 1mm e comprimento de 1050mm; Montagem com 4 kitsatos de titulometria.

Condições: Solução $\text{KIO}_3 = 0,2225\text{g}$ para 1000ml de H_2O ; Temperatura: 850 +/- 5°C; Aquecimento: 1 NL/min de N_2 (por 90min); Estabilização: 3 NL/min de N_2 (por 15min); Redução: 3 NL/min de H_2 por 165min (ir titulando o H_2S); Resfriamento: 2 a 5 NL/min de N_2 .

Peneiramento malhas (mm): Antes: Retirada da faixa. **Depois:** Não utilizado.

Expressão de resultados: 1ml KIO_3 corresponde a 0,1mg de S; $\text{LS} = (\text{V}/\text{m})\times 100$;
Onde: LS = liberação de enxofre (ppm) (resultado com uma casa decimal); V = volume total gasto da solução titulante (ml); m = massa da porção teste (g); Obs.: se a solução de KIO_3 for mais concentrada (2,225g para 1000ml H_2O) então 1ml KIO_3 corresponde a 1mg de S. Deste modo: $\text{LS} = (\text{V}/\text{m})\times 1000$.

Tolerância permissível: Ainda em estudo na ISO.

Índices de referência: $\text{LS} \leq 10\text{ppm}$ (para processo Midrex).

Tempo (h): 21,5.

Custo (US\$): 51,2.

O índice de degradação sob redução (RDI) encontra-se detalhado na norma ISO 4696-2 (1998). Os testes padronizados objetivam avaliar a resistência à desintegração do

produto à baixa temperatura, em condições fracamente redutoras. O índice é definido pela maior ou menor facilidade que tem o material de produzir finos durante a sua redução. A degradação do produto, quando o mesmo é submetido à redução, acontece principalmente quando a hematita (forma hexagonal) é reduzida a magnetita (forma cúbica) a uma temperatura entre 375 a 425⁰C. Esta mudança provoca uma expansão de volume da ordem de 20%, acarretando o enfraquecimento e a geração de finos. O material de granulometria inferior influencia na permeabilidade do leito dentro do reator, provocando alteração na marcha operacional do mesmo, ocasionando, eventualmente, arriamento e engaiolamento da carga.

A seguir o detalhamento do ensaio do índice de degradação sob redução (RDI):

Objetivo: Determinar o índice de degradação sob redução.

Aplicação: Alto forno.

Norma: ISO 4696-1: 1996.

Produto avaliado: Pelota / Granulado / Sinter.

Massa (g): 500,0g +/- 1 partícula para cada porção teste.

Faixa granulométrica (mm): pelota: (-12,5;+10,0) granulado / sinter: (-12,5;+10,0) (incorporação da fração +12,0 britada).

Ensaio: Mínimo de 2 porções teste.

Equipamentos: Forno elétrico vertical; Retorta de diâmetro interno igual a 75,0 +/- 1mm e comprimento de 1050mm; Tambor de 130mm de diâmetro interno por 200mm de comprimento com duas aletas.

Condições: Temperatura: 500 +/- 5°C; Aquecimento: 20 NL/min de N₂; Estabilização: 20 NL/min de N₂ (por +/- 15min); Redução: 20 NL/min (20% CO; 58% N₂; 20% CO₂; 2% H₂) por 60min; Resfriamento: 20 NL/min de N₂. Tamboramento a 30 +/- 1rpm por 300 voltas; Peneiramento em 6,3; 3,15 e 0,5mm.

Peneiramento malhas (mm): Antes: Retirada da faixa. **Depois:** 6,3; 3,15 e 0,50 mm.

Expressão de resultados: $RDI_{+6,3mm} = (m_1/m_0) \times 100$. $RDI_{-3,15mm} = ((m_0 - (m_1 + m_2))/m_0) \times 100$. $RDI_{-0,50mm} = ((m_0 - (m_1 + m_2 + m_3))/m_0) \times 100$ Onde: $RDI_{+6,3mm} = (\%+6,3mm)$ (resultado com uma casa decimal). $RDI_{-3,15mm} = (\%-3,15mm)$ (resultado com uma casa decimal). $RDI_{-0,50mm} = (\%-0,50mm)$ (resultado com uma casa decimal).

m_0 = massa da porção teste após redução e antes do tamboramento. m_1 = massa da porção teste retida em 6,3mm (g). m_2 = massa da porção teste retida em 3,15mm (g). m_3 = massa da porção teste retida em 0,50mm (g).

Tolerância permissível: diferença entre as duas porções-teste $\leq 1\%$ (95% de confiança).

Tempo (h): 22,3.

Custo (US\$): 110,38.

Os testes de redutibilidade, que tem como base a norma ISO 7215 (1995), avaliam o grau de facilidade com que o produto enornado perde oxigênio para o gás redutor. O grau de redução é mensurado pela quantidade de oxigênio removida dos óxidos de ferro, expressa como a razão do oxigênio removido para o oxigênio originalmente combinado com o ferro. A redutibilidade é importante para o estabelecimento de critérios comparativos de avaliação do comportamento da carga metálica, podendo suas variações estar associadas ao coke-rate, ao grau de redução indireta no alto-forno, à taxa de utilização do gás redutor, etc., parâmetros estes ligados ao desenvolvimento das reações de redução na cuba (Pimenta, 1989). O índice de redutibilidade é afetado pela porosidade dos minérios: minérios porosos, a redutibilidade é maior; minérios compactos, a redutibilidade é menor. A mineralogia e o nível de alteração dos minérios também afetam significativamente a redutibilidade dos granulados de minério de ferro.

A seguir os detalhes do ensaio de redutibilidade:

Objetivo: Avaliar a facilidade na qual o oxigênio ligado ao ferro é removido, quando submetido a condições definidas de temperatura e gás redutor.

Aplicação: Alto forno.

Norma: ISO 4695:1995.

Produto avaliado: Pelota / Granulado / Sinter.

Massa (g): 500,0g +/- 1 partícula para cada porção teste.

Faixa granulométrica (mm): pelota: (-12,5;+10,0) granulado / sinter: (-12,5;+10,0) (incorporação da fração +12,0 britada).

Ensaio: Mínimo de 3 porções teste (1 porção teste para análise química).

Equipamentos: Forno elétrico vertical; Painel controlador dotado de balança com capacidade para aproximadamente 16kg; Retorta de diâmetro interno igual a 75,0 +/- 1mm e comprimento de 1050mm.

Condições: Temperatura: 950 +/- 10°C; Aquecimento: 25 NL/min de N₂; Estabilização: 50 NL/min de N₂ (até massa constante); Redução: 50 NL/min (40% CO, 60% N₂) até perda de oxigênio atingir 65% ou atingir 4 horas de redução; Resfriamento: 5 NL/min de N₂; Calcular massa de O₂ perdida..

Peneiramento malhas (mm): Antes: 16,0; 12,5; 10,0. **Depois:** não utilizado.

Expressão de resultados: $\%R = \frac{(0,111 \times FeO)}{(0,43 \times FeT)} + \frac{(m_1 - m_2)}{(m_0 \times 0,43 \times FeT)} \times 100$ $(dR/dT)_{40} = 33,6 / (t_{30} - t_{60})$ Onde: **%R** = Grau de redução (resultado com uma casa decimal). **m₀** = massa inicial da porção-teste (g). **m₁** = massa da porção-teste imediatamente antes da redução (g). **m₂** = massa da porção-teste após a redução (g). **FeT** = teor de ferro total contido na porção teste. **FeO** = Teor de óxido de ferro II contido na porção teste. **T₃₀** = tempo para o grau de redução atingir 30% (min). **T₆₀** = tempo para o grau de redução atingir 60% (min).

Tolerância permissível: Pelota: a diferença entre duas porções teste < 3,5% da média. Granulado: a diferença entre duas porções teste < 0,05%. Sinter: a diferença entre duas porções teste < 0,085%.

Índices de referência: Granulado: $(dR / dT)_{40} < 20$.

Tempo (h): 13,1.

Custo (US\$): 197,3.

A determinação dos índices de crepitações faz parte da norma ISO 8371 (1994) e é usado para avaliar o comportamento dos produtos granulados de minério de ferro, quando submetido a um rápido aquecimento (700 °C) em um tempo de 30 minutos. Isto é feito pela medida da massa de material passante em uma peneira de 6,30 mm, após o ciclo de aquecimento. Os efeitos da crepitação são prejudiciais à boa marcha do forno devido ao volume de finos gerados, que obstruem os interstícios e impedem a passagem de gases, reduzindo a permeabilidade e, conseqüentemente, a produção de gusa. A crepitação se caracteriza pelo fato de, durante o aquecimento, em atmosfera oxidante ou neutra, o minério se romper, geralmente de modo explosivo, gerando considerável quantidade de finos (Lemos et al., 1978). Embora existam várias teorias para explicar o

fenômeno, os mecanismos mais aceitos são a anisotropia e hidratação. A anisotropia está associada à orientação preferencial dos cristais de hematita, aliada à diferença de tamanho entre os grãos. A dilatação da rede cristalina provoca um “esfoliamento” da estrutura do minério. A hidratação se refere à liberação da água de cristalização em forma de vapor, provocando rupturas no minério. A porosidade do minério reduz o efeito da crepitação.

Segue abaixo os detalhes dos testes de crepitação:

Objetivo: Avaliar a resistência do produto ao choque térmico na cuba do alto forno.

Aplicação: Alto forno.

Norma: Baseado ISO 8371: 1994.

Produto avaliado: Granulado.

Massa (g): 500,0g +/- 1 partícula para cada porção teste.

Faixa granulométrica (mm): (-25,0; +20,0).

Ensaio: 10 porções teste.

Equipamentos: Forno elétrico; Recipientes de chapa de aço para acondicionamento das porções-teste.

Condições: Secagem das porções-teste por 24 horas em estufa à 105,0 +/- 5°C; Retirada de finos utilizando a peneira de 20,0mm; Submeter as porções-teste a 700°C por 30min; Peneirar em 6,3mm; 4,75mm; 3,15mm e 0,50mm.

Peneiramento malhas (mm): Antes: Retirada da faixa. **Depois:** 6,3; 4,75; 3,15 e 0,50

Expressão de resultados: $IC_{-6,3mm} = (m_1 / m_0) \times 100$; $IC_{-4,75mm} = (m_2 / m_0) \times 100$;

Onde: $IC_{-6,3mm}$ = índice de crepitação (% -6,35mm) (resultado com uma casa decimal);

$IC_{-4,75mm}$ = índice de crepitação (% -4,75mm) (resultado com uma casa decimal); m_0 =

massa total da porção teste após tratamento térmico (g); m_1 = massa passante acumulada na peneira de 6,35mm (g); m_2 = massa passante acumulada na peneira de 4,75mm (g).

Tolerância permissível: Não especificado.

Índices de referência: $IC_{-6,3mm} < 10,0\%$.

Tempo (h): 57,2.

Custo (US\$): 7,92.

Os testes metalúrgicos da norma ISO 3271 (1995), avaliam a resistência à degradação dos produtos granulados de minério de ferro, durante o manuseio e transporte (impacto e abrasão), utilizando um tambor rotativo padrão. O índice de tamboramento é expresso como o percentual de massa de tamanho >6,30 mm em uma amostra após o teste de tamboramento, sendo uma medida relativa da resistência do produto granulado de minério de ferro. O índice de abrasão é uma medida relativa da degradação do granulado por abrasão. É expresso como o percentual em massa <0,50 mm em uma amostra após o teste de tamboramento. A quebra das partículas durante o manuseio e transporte, promove uma geração de finos inadequada ao uso na siderurgia que, geralmente, são retirados através de peneiramento no porto das grandes mineradoras, ou antes, do enformamento dos produtos pelo cliente.

A seguir o detalhamento dos ensaios de tamboramento:

Objetivo: Avaliar a resistência à degradação do produto durante o transporte e manuseio.

Aplicação: Alto forno e processo de redução direta.

Norma: ISO 3271: 1995; procedimento HYL.

Produto avaliado: Pelota / Granulado / Sinter.

Massa (g): 15 +/- 0,15kg para cada porção teste.

Faixa granulométrica (mm): pelota: (-40,0;+6,3) granulado / sinter: (-40,0;+10,0).

Ensaio: Mínimo de 2 porções teste.

Equipamentos: Tambor circular de 1000mm de diâmetro interno e 500mm de comprimento interno com duas aletas; Recipiente para coleta da porção-teste.

Condições: Promover o tamboramento das porções-teste a 25 rpm por um total de 200 revoluções.

Peneiramento malhas (mm): Antes: 40,0; 25; 16,0; 10,0 e 6,3. **Depois:** 6,3; e 0,5.

Expressão de resultados: $TI = (m_1 / m_0) \times 100$; $AI = ((m_0 - (m_1 + m_2)) / m_0) \times 100$;

Onde: **TI** = índice de tamboramento (% +6,3mm) (resultado com uma casa decimal); **AI** = índice de abrasão (% -0,5mm) (resultado com uma casa decimal); **m₀** = massa total da porção teste (kg); **m₁** = massa da porção teste retida na peneira de 6,3mm (kg); **m₂** = massa da porção teste retida na peneira de 0,5mm (kg).

Tolerância permissível: TI: diferença entre as duas porções-teste $\leq 1,4\%$ absoluta; AI: diferença entre as duas porções-teste $\leq 0,8\%$ absoluta; Perda de massa $\leq 0,01x m_0$.

Índices de referência: TI Pelota: Midrex: $> 92\%$ / HYL: $> 95\%$; TI Granulado: Midrex: $> 90\%$ / HYL: $> 85\%$ / Alto Forno: $> 80\%$.

Tempo (h): 13,8.

Custo (US\$): 9,24.

3.4 – Revisão bibliográfica dos produtos granulados de minério de ferro

A indústria siderúrgica mundial tem uma demanda consolidada para produtos granulados utilizados como redução direta e alto-forno. A tabela III.1 sumaria as principais características dos produtos granulados destinados para os processos de redução direta e altos-fornos. Os limites de especificações são definidos em cláusulas contratuais convenientemente acordadas com os clientes.

Tabela III.1 - Características comerciais dos produtos granulados utilizados como redução direta e alto-forno, segundo Souza, 1999.

Propriedade Metalúrgica, Química e Granulometria	Produtos granulados de minério de ferro	
	Granulado redução direta	Granulado alto-forno
Grau de Metalização (MLT) GM (%)	≥ 90%	Sem especificação
Finos Gerados (MLT) FG (% <3,35 mm)	≤ 10%	Sem especificação
Liberação enxôfre (LS) (ppm)	≤ 10%	Sem especificação
Redutibilidade (% de redução)	≥ 40%	≥ 45%
RDI (% < 2,80 mm)	≤ 25%	≤ 25%
Índice de crepitação (< 6,30 mm)	≤ 10%	≤ 10%
Tamboramento (TI: % > 6,30 mm)	≥ 90%	≥ 75%
Abrasão (AI: % < 0,50 mm)	≤ 10%	≤ 10%
Teor Fe Total	66,80 a 67,40%	64,80 a 66,00%
Teor SiO ₂	1,50 a 1,90%	1,80 a 2,40%
Teor Al ₂ O ₃	0,70 a 1,10%	1,50 a 2,10%
Teor P	0,050 a 0,060%	0,060 a 0,070%
Teor Mn	0,200 a 0,300%	0,250 a 0,450%
Perda por calcinação (PPC)	0,40 a 0,80%	1,60 a 2,20%
Over Size (% >31,50 mm)	6,00 a 7,00%	6,00 a 8,00%
Under size (% <6,30 mm)	4,00 a 8,00%	6,00 a 10%

OBS: MLT – Midrex Linder Test: conjunto de testes metalúrgicos específicos para avaliar produtos granulados de minério de ferro utilizados na redução direta.

Nos produtos granulados utilizados em processos de redução direta, a remoção do oxigênio presente (em torno de 30% na fórmula da hematita Fe₂O₃) se faz mediante reações tipo contato gás redutor com o minério granulado. O produto decorrente desta reação chama-se ferro esponja, que é um insumo para a fabricação do aço em fornos elétricos. A faixa granulométrica é de 31,50 a 6,30 mm, altos teores de ferro (67,00 a 68,00%) e níveis de impurezas muito baixos (alumina, sílica, fósforo, manganês, cálcio enxofre, etc.). O produto tem maior valor agregado devido as suas propriedades químico-metalúrgicas específicas, principalmente os altos percentuais de redutibilidade (Souza, 1999).

Os processos de redução direta com redutor gasoso são: a) forno de cuba: Midrex e HYL; b) leito fluidizado. A figura 3.14 resume o processo Midrex (www.midrex.com).

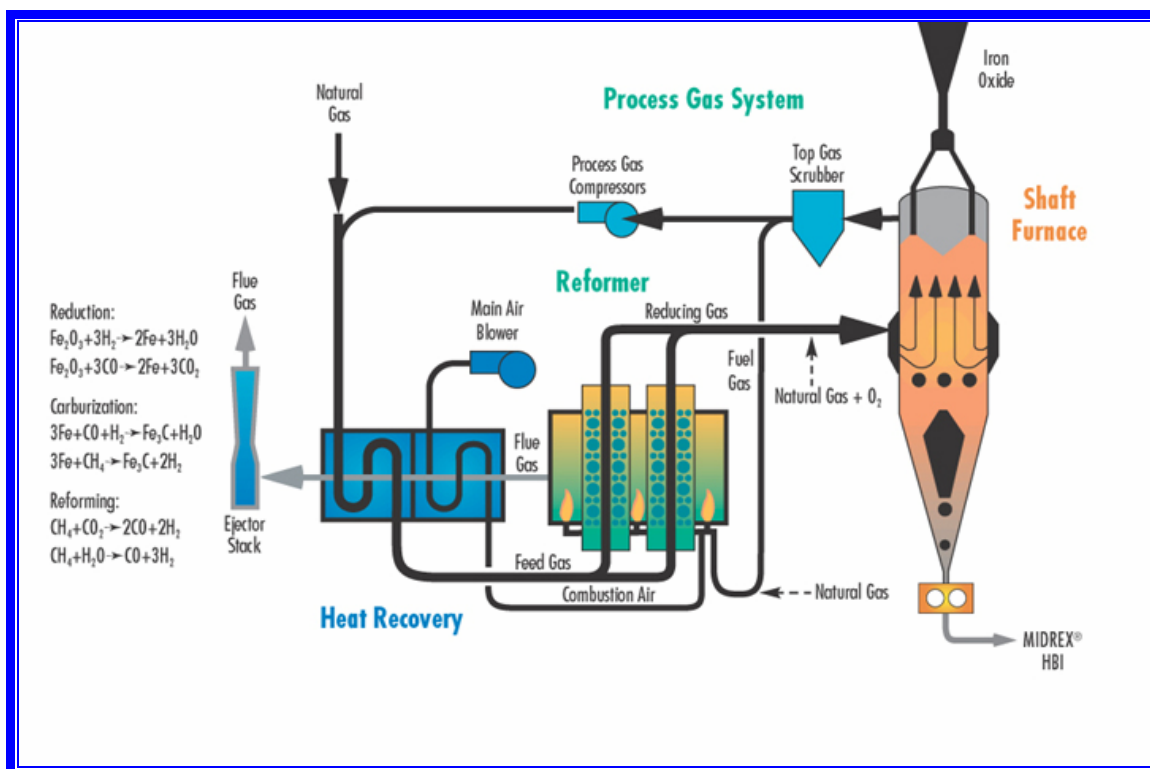


Figura 3.14 – Resumo do Processo Midrex de redução direta de minério de ferro granulado (www.midrex.com).

O óxido de ferro na forma de pelota ou granulado é introduzido através de um alimentador no topo do forno. Como o minério descende através do forno por fluxo de gravidade, é aquecido e o oxigênio é removido do minério de ferro pelo fluxo de gases, os quais apresentam alto conteúdo de H_2 e CO . Estes gases reagem com Fe_2O_3 no minério de ferro e o convertem em ferro metálico, liberando H_2O e CO_2 . Para maximizar a eficiência do gás reformado, ocorre uma reciclagem do gás no interior do forno, ocorrendo uma mistura com o gás natural fresco (www.midrex.com).

Em termos de composição química do produto granulado (lump ore ou pelota), os percentuais de alumina, sílica, fósforo, enxofre e álcalis ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) devem ser baixos, pois são altamente prejudiciais à redução direta. Quanto mais estreita a faixa granulométrica e quanto menor o tamanho das partículas, maior será a velocidade da redução. Partículas menores reduzem a permeabilidade do leito, reduzindo a velocidade de redução.

Os produtos granulados destinados à redução direta ou alto-forno apresentam comportamentos diferenciados nos processos metalúrgicos, dependendo das características dos minérios. Quanto maior for a resistência mecânica, menor a geração de finos no manuseio e transporte. Índices de crepitações menores geram menor quantidade de finos e mais permeável será o leito. Redutibilidades elevadas aumentam a eficiência da carga metálica. Quanto maior for o índice de degradação sob redução (RDI), menor será a eficiência de redução da carga metálica na redução direta. Quanto maior for o inchamento e a colagem, menor será a eficiência de redução da carga metálica (Castro e Tavares, 2006).

Os produtos granulados de minério de ferro, quanto à variável metalúrgica crepitação, podem ser classificados em três tipos (Castro e Tavares, 2006): **a)** minérios cujo comportamento diante do fenômeno da crepitação está estreitamente ligado à quantidade de água de hidratação, a degradação ocorre devido à decomposição dos compostos hidratados, como exemplo a goethita; **b)** minérios que apesar de não apresentarem quantidades apreciáveis de água de hidratação são fortemente susceptíveis à crepitação, sendo que pequenas incrustações de goethita geram tensões suficientes para a degradação do minério; **c)** minérios com teores elevados de água de hidratação, mas com baixos índices de crepitação, estão associados a minérios porosos, onde o vapor de água gerado não encontra resistência na saída.

A figura 3.15 sistematiza a produção de ferro gusa líquido pelo processo alto-forno. A representação esquemática foi extraída do trabalho de Castro e Tavares (2006). A zona granular é a região do alto-forno onde toda a carga se encontra no estado sólido; a zona de amolecimento e fusão é a região do alto-forno onde os componentes da carga metálica e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem, ocorrendo a maior perda de carga no alto-forno; todos os materiais carregados, exceto o coque, encontram-se na fase líquida, na zona denominada de gotejamento.

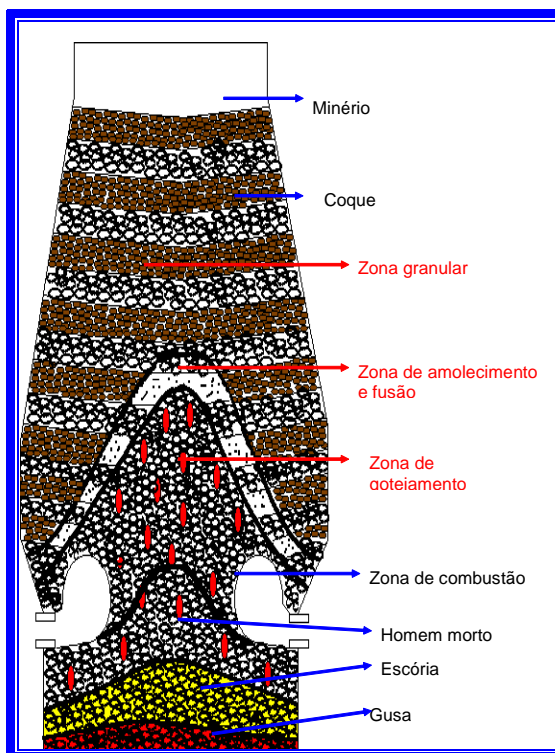


Figura 3.15 – Representações dos aspectos internos do alto-forno na produção de ferro gusa, segundo Castro e Tavares (2006).

Os produtos granulados de minério de ferro são utilizados principalmente como parte da carga de altos-fornos, mas também encontrando aplicação como “refrigerante” (oxidante) em aciarias. A faixa granulométrica é similar aos produtos destinados à redução direta (31,50 a 6,30 mm), com os teores de ferro total variando entre 66,0 a 67,5% e baixo nível de impurezas, principalmente sílica, alumina e fósforo (Souza, 1999).

A distribuição granulométrica e, conseqüentemente, o tamanho médio das partículas é importante, pois irão influir na distribuição dos gases no interior do alto-forno. A fração < 5,00 mm deve ser a menor possível. A partir de um tamanho médio adequado, a faixa deve ser a mais estreita possível. Minérios granulados com grandes quantidades de finos (> 10% na fração < 10,00 mm) afetam negativamente a permeabilidade do leito no interior do forno. Por outro lado, minérios com quantidades elevadas de frações grossas (> 37,00 mm) tendem a ter sua condição de redutibilidade dificultada, uma vez que a operação do alto-forno é função de um tempo limitado entre o carregamento e a

produção correspondente do ferro gusa. Deve-se buscar o equilíbrio entre estas duas faixas granulométricas indesejáveis (Lemos et al., 1978).

A avaliação química dos produtos granulados permite uma previsão quanto à condição de utilização, tornando-se necessário o estabelecimento de limites de especificações. Os parâmetros químicos principais são: Fe total, SiO_2 , Al_2O_3 , P, Mn, MgO, CaO e TiO_2 (Lemos et al., 1978). Alguns compostos necessitam de controle maior, conforme os comentários a seguir.

- **Teor de ferro total:** elemento que se quer obter para a produção de gusa. Se sua concentração for baixa, estão sendo carregadas impurezas para o alto-forno.
- **Teor de sílica:** composto que está relacionado diretamente com o volume de escória. Sua elevação implica em aumento no consumo de calcário e de coque.
- **Teor de fósforo:** o enobrecimento do aço tem exigido reduções nos teores de fósforo do gusa (fragilizador do aço). Praticamente todo o fósforo carregado é incorporado ao gusa (90 a 95%), tornando-se necessária a desfosforação na aciaria, implicando em operações auxiliares difíceis e de alto custo.
- **Teor de enxofre:** elemento prejudicial ao aço, sendo a maior parte proveniente do coque. Parte do enxofre é eliminada no alto-forno através da escória, havendo necessidade de uma dessulfuração complementar.
- **Álcalis e zinco:** estes elementos são prejudiciais à operação do forno devido ao baixo ponto de fusão e vaporização, fazendo com que fiquem circulando dentro do forno. Há uma concentração diferente por pontos, sendo que na zona coesiva está a maior concentração. Interferem na temperatura de amolecimento e contribuem para a formação de cascão no alto-forno.

Os finos medidos nos ensaios de tamboramento são diretamente proporcionais à quantidade de finos gerados na redução. Quanto mais baixos os índices de

tamboramento, menor a quantidade de finos gerados na redução, sendo resultados positivos para a siderurgia.

A diminuição na quantidade de gás requerida em um alto-forno para produzir uma tonelada de ferro está diretamente associada com a diminuição no consumo específico de agentes redutores, o que está ligado diretamente à redutibilidade do minério, ou ao uso de minérios mais ricos. Através da zona granular, o minério granulado carregado junto com sinter reduz a fração de vazios do sinter diretamente localizado nas áreas vizinhas de forma que a permeabilidade do gás é substancialmente reduzida, até um ponto em que causa distúrbio no processo de redução. Uma composição típica para altos-fornos a coque é a seguinte: 75% sinter, 17% lump ore e 8% de pelota. Esta composição combina custo mais baixo e, do ponto de vista técnico, principalmente em relação à permeabilidade e propriedades de amolecimento e fusão, bem como um rendimento adequado da carga metálica (Souza et al., 1998).

Nosaka (1999) estudou as assembléias mineralógicas dos minérios compactos das Minas de Abóboras, Pico e Sapecado, que fazem parte deste trabalho. O minério hematítico compacto de Abóboras apresenta uma estrutura laminada, com grãos de hematitas placóides, uma porção relativamente porosa de hematita e martita, pouca especularita e relictos de magnetita. O minério compacto de Abóboras é mais poroso que os minérios hematíticos compactos do Pico e Sapecado. O minério compacto hematítico do Sapecado apresenta uma estrutura laminada, composta por partes maciças e porosas de grãos de hematita, porções aglomeradas de martita, goethita e relictos de magnetita.

Hida (2000) efetuou vários testes metalúrgicos com amostras de granulados da Vale, caracterizados como de alto-forno. O material fino (partículas < 0,50 mm) encontra-se aderido às partículas maiores, mas o quantitativo é baixo. Todas as partículas mostram estruturas laminadas, densas e homogêneas. Alguns fragmentos são porosos e heterogêneos, também ocorrendo partículas mistas. Em termos de microestruturas, nas partículas densas ocorrem poros distribuídos entre os grãos das hematitas; predominam as formas placóides e granulares, entre os minerais hematíticos. Também existem

pequenas quantidades de magnetitas e as hematitas especulares estão localizadas nas bordas dos cristais de hematitas granulares. As goethitas são comuns, circulando os poros.

A distribuição granulométrica, bem como o tamanho médio das partículas dos minérios granulados são características importantes para o alto-forno, influenciando na distribuição dos gases. Na fração menor que 5 mm, que deve ter o menor percentual possível, o controle é acentuado. A partir de um tamanho médio adequado, a faixa granulométrica deve ser a mais estreita possível. Minérios com grande quantidade de finos, afetam a permeabilidade do leito no interior do alto-forno, enquanto os minérios com percentuais elevados nas frações grossas (> 40 mm) tendem a ter uma condição de redutibilidade mais dificultada. Deve-se buscar equilibrar a distribuição granulométrica, principalmente entre as duas faixas indesejáveis: < 10 mm: < 10%; > 40 mm: 0%. A resistência dos minérios granulados está associada à sua constituição mineralógica. O minério mais compacto apresenta alta resistência, enquanto o mais poroso tem menor resistência à degradação. Os efeitos da crepitação são prejudiciais ao alto-forno, devido ao volume de finos gerados, que obstruem os interstícios e impedem a passagem de gases, reduzindo a permeabilidade e, conseqüentemente, a produção de gusa. A crepitação se caracteriza pelo fato de, durante o aquecimento, em atmosfera oxidante ou neutra, o minério se rompe geralmente de modo explosivo, gerando considerável quantidade de finos (Lemos et al., 1978).

A desintegração de produtos granulados de minério de ferro é principalmente causada pelo impacto durante a queda do material e no descarregamento em geral. A principal característica é a resistência mecânica, seguida pela densidade, tamanho dos fragmentos, distribuição granulométrica e conteúdo inicial de finos. Testes de queda de produtos granulados concluíram que a queda de material de alturas maiores causa a mesma degradação relativa a várias quedas a partir de alturas menores e correspondem à mesma altura relativa. Quando ocorre uma descarga de material granulado, ocorre uma degradação por fricção entre as partículas, semelhante a um teste de abrasão. A degradação depende da densidade do material, sendo que os materiais com densidade mais alta, geram mais finos (Fagerberg e Sandberg, 1973). As observações acima não

levam em consideração a heterogeneidade dos produtos granulados, com comportamento diferenciado das partículas dependendo da resistência mecânica das mesmas. Os fragmentos compactos, com maior resistência, contribuem para gerar finos pelo atrito com partículas de menor resistência mecânica. Avaliando as quedas de material à alturas diferentes, as várias quedas a partir de alturas menores têm tendência a gerar mais finos, correspondendo a um manuseio (*handling*) mais significativo, sendo contraditório às afirmações dos autores. A densidade maior está associada aos fragmentos mais compactos, com maior resistência mecânica à geração de finos.

Norgate et al. (1986) empreenderam um estudo para investigar as propriedades de quebra de dois tipos de minérios: duro e macio, provenientes da região de Pilbara, oeste da Austrália. Foi feita uma série de testes de queda, com altura variando de 0,9 a 32 metros. As tipologias dos minérios são características muito importantes para prever o percentual de finos gerados no manuseio e transporte. Os minérios mais macios geram em torno de 12% a mais de finos, quando comparados aos minérios mais duros ou compactos. A altura de queda total é o principal fator que afeta a geração de finos. O grau de degradação pode ser reduzido se uma grande queda for substituída por uma série de quedas menores, equidistantes cerca de um metro.

É muito importante buscar controlar a geração de finos nos produtos granulados de minério de ferro. Os minérios mais friáveis tendem a gerar mais finos, durante o manuseio e transporte. Testes efetuados com lotes de três tipos de produtos granulados de minério de ferro mostraram diferentes razões de quebra. Estas diferenças foram confirmadas em testes de quebra, executados em um dispositivo composto por dois pêndulos, monitorados a laser, alimentando um programa específico de computador. A geração de um novo modelo de degradação para prever a geração de finos durante o manuseio, tendo como base as quedas de material a várias alturas, permite estabelecer o controle da quebra dos produtos granulados, simulando o manuseio e transporte (Weedon e Wilson, 1999). As fórmulas abaixo foram desenvolvidas com base nos estudos experimentais com pêndulos levados a efeito pelos autores.

Conservação da quantidade de movimento:

$$m_1 \cdot \mu_1 + m_2 \cdot \mu_2 = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 \quad (\text{A1})$$

Onde μ_1 e μ_2 são a entrada e recochete das velocidades do pêndulo, antes do impacto; m_1 e m_2 são as massas de entrada (4.108 kg) e repercussão (6.234 kg) do pêndulo, respectivamente; v_1 e v_2 são a entrada e recochete das velocidades após impacto.

Lei de Restituição de Newton:

$$v_2 - v_1 = e(\mu_2 - \mu_1) \quad (\text{A2})$$

Onde e representa o coeficiente de restituição. Substituindo v_1 na equação (A1) com $\mu_2 = 0$; $e = (m_1 + m_2)/m_1(v_2/\mu_1 - 1) = 0$, para colisões inelásticas.

Equação de Energia (assumindo que as perdas do sistema são constantes); Energia de entrada (E_1) = Energia de saída (E_{OC}) + Energia de cominuição (E_c);

$$\frac{1}{2}(m_1 \cdot \mu_1^2 + m_2 \cdot \mu_2^2) = \frac{1}{2}(m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2) + E_c \quad (\text{A3})$$

Combinando as equações (A1) - (A3), pode ser calculada a **energia de cominuição específica**: $E_{cs} = \{m_2/(m_1 + m_2)\}(1 - e^2)E_1$.

As características metalúrgicas dos produtos granulados estão associadas à consistência dos tipos litológicos. A redutibilidade e RDI são mais elevadas nos produtos derivados de itabiritos, valores intermediários nos minérios hematíticos médios e macios e índices menores nos minérios hematíticos compactos. Os índices de crepitação são menores nos minérios itabiríticos, intermediários nos minérios hematíticos médios e macios e valores mais elevados nos minérios hematíticos compactos. Os índices de tamboramento são menores nos minérios itabiríticos, valores médios nos minérios hematíticos médios e macios e altos índices nos minérios compactos (Fernandes, 2003).

As tramas dos minérios hematíticos de amostras das Minas do Pico e Galinheiro são do tipo granolepidoblástica, lepidogranoblástica e granoblástica. A assembléia mineralógica é composta por grãos de hematita, hematita martítica, goethita e relictos de magnetita. A porosidade é muito variável, associada às bandas compactas menos porosas e bandas onde a porosidade é mais alta. Predomina uma porosidade na faixa mediana (Brandão e Santos, 1997).

As resistências mecânicas de materiais brutos derivados de minério de ferro são usualmente determinadas por testes de tamboramento (tumbler test) e quebra (shatter test). Embora haja uma determinação de um resultado médio global para uma amostra, o índice de resistência é empírico e não pode ser usado para prever a extensão da quebra de um determinado tipo de material, submetido a um circuito de manuseio. Um novo procedimento experimental tem sido desenvolvido para medir a resistência baseada na extensão da quebra de aglomerados repetidamente tombados de uma altura pré-determinada. O procedimento de queda, combinado com as teorias de impacto e quebra, tem sido usado para quantificar o efeito do tamanho da partícula e a altura da queda na extensão da quebra de materiais granulados de minério de ferro, sinter, carvão e coque. Os resultados obtidos a partir de uma planta experimental indicaram que o procedimento de queda poderia também ser usado para examinar o efeito da estabilização do material frágil devido à repetição das quedas durante o manuseio (Teo et al., 2003).

A sistemática empreendida e a necessidade de prever a quantidade de finos produzida durante o manuseio e transporte de produtos granulados de minério de ferro, reveste-se de grande importância para os fornecedores de minério de ferro. Este estudo combina o contato simples e a fratura mecânica aproximada, para deduzir uma equação de quebra do minério de ferro granulado fraturado em um teste de tamboramento, com base na norma internacional ISO 3271 (1995). O teste de tamboramento simula as forças experimentadas pelo produto granulado de minério de ferro durante o manuseio de baixo impacto e eventos durante o transporte. Os resultados dos testes de tombo em três tipos de minérios Australianos de larga variação das propriedades mecânicas mostraram que a previsão de geração de finos por uma simples equação de quebra é proporcional às medidas experimentalmente (Dukino et al., 1999). As principais conclusões do trabalho estão sumarizadas a seguir: a) a equação de quebra na superfície de fratura dos granulados causada por pequenos impactos foi derivada usando um simples contato e fratura mecânica aproximada e requer conhecimento de resistência da fratura e densidade dos granulados de minério de ferro; b) a equação de quebra forneceu uma razoável previsão da massa de finos produzida durante os testes de tamboramento dos três tipos de granulados. Este teste foi considerado para simular os eventos de manuseio

e transporte tais como o fluxo em alimentadores e pequenas quedas como aquelas situadas nos pontos de transferências de correias; c) a acuracidade do modelo poderia ser melhorada levando em consideração os seguintes pontos: 1) forças de torção e deslizamento durante o impacto; 2) fraturas geradas durante o contato elástico/plástico; 3) geometria do granulado na distribuição das tensões e geometria e/ou dimensões da ruptura do granulado.

Os depósitos de minério de ferro de Baffin Island, situados em Nunavut, Canadá, fazem parte da província de minério de ferro de Mary River. A Companhia Baffinland Iron Mine Corporation está efetuando um grande programa de pesquisa geológica, iniciado em 2004, onde estão incluídas análises químicas, físicas, mineralógicas e metalúrgicas do minério amostrado nas campanhas de sondagem. Em termos mineralógicos os percentuais de magnetita são muito elevados, com média acima de 30%, atingindo até 90% em algumas amostras. O mineral hematita encontra-se associado à magnetita, compondo a assembléia mineralógica dos depósitos. Os teores de ferro variam de 62 a 69%, os teores de sílica variam de 0,5 a 2%, a faixa da alumina está abaixo de 1,2% e os teores de fósforo predominam na faixa abaixo de 0,020%, mas ocorrem teores acima de 0,100%, em algumas amostras de testemunhos de sondagem. Os testes metalúrgicos de redutibilidade estão entre 30 e 50%, com média acima de 40%, dependendo da porosidade, permeabilidade, tamanho de grão, mineralogia e teor de ferro. Os testes de redutibilidade demonstraram que essa variável metalúrgica não está associada ao percentual de magnetita, tendo sido feitos vários ensaios buscando amostras situadas em determinadas faixas de concentração de magnetita. A porosidade média está situada na faixa de 10% e os teores de enxofre médio está acima de 0,050 ppm, inviabilizando o granulado para redução direta, estando mais adequado à utilização como de alto-forno (Heffernan, 2004).

3.5 – Procedimento padrão de amostragem e preparação de amostras de produtos granulados de minério de ferro

A base do projeto de pesquisa está fundamentada na amostragem e preparação de amostras dos produtos granulados, sendo a norma NBR ISO 3082 (2003), tomada como

padrão. As principais considerações da norma que são aplicadas no projeto estão resumidas nos parágrafos a seguir.

Os objetivos principais da norma são: **a)** estabelecimento da base teórica; **b)** princípios básicos de amostragem e preparação; **c)** requisitos básicos para o projeto, instalação e operação dos sistemas de amostragem para coleta mecânica, amostragem manual e preparação de amostras para determinar sua composição química, teor de umidade e distribuição granulométrica. Os métodos especificados nesta norma são aplicáveis tanto ao carregamento quanto à descarga de um lote por meio de correias transportadoras e outros equipamentos de manuseio de minério, nos quais um amostrador mecânico possa ser instalado ou onde a amostragem manual possa ser conduzida com segurança.

Em termos de requisitos básicos, a amostragem correta é garantir que todas as partes do minério no lote tenham a mesma oportunidade de serem selecionadas e tornarem-se parte de uma amostra parcial ou amostra global para análise. Qualquer desvio deste requisito básico pode resultar em uma perda inaceitável de exatidão e precisão. Um esquema incorreto de amostragem não é confiável para fornecer amostras representativas.

O melhor local de amostragem para satisfazer o requisito descrito acima é no ponto de transferência entre correias transportadoras. Neste local, uma seção transversal completa do fluxo do minério pode ser adequadamente interceptada a intervalos regulares, permitindo a obtenção de amostras representativas. A amostragem com base na massa é feita através da coleta de incrementos em iguais intervalos de massa, sendo as massas dos incrementos o mais uniforme possível. Não deve ser introduzido “vício” por variação periódica na qualidade ou quantidade, sendo aplicável à amostragem aleatória estratificada com intervalos fixos de massa ou de tempo.

O procedimento para estabelecimento do esquema de amostragem é o seguinte: a) identificar o lote a ser amostrado; b) verificar o tamanho máximo nominal; c) determinar a massa do incremento considerando o tamanho máximo nominal, o equipamento de manuseio do minério e o dispositivo de coleta dos incrementos; d) especificar a precisão requerida; e) determinar o número mínimo de incrementos

primários, a ser coletado do lote por amostragem sistemática ou aleatória estratificada; f) determinar o intervalo de amostragem em toneladas, para amostragem base massa ou em minutos para amostragem base tempo; g) determinar o local de amostragem e o método de coleta de incrementos; h) coletar incrementos com massa praticamente uniforme para amostragem base massa ou com massa proporcional à taxa do fluxo do minério no momento da amostragem base tempo; i) determinar se será adotado o uso individual de partes da amostra ou o uso múltiplo da amostra; j) estabelecer o método de combinação dos incrementos para composição da amostra global ou das amostras parciais; l) estabelecer o procedimento de preparação de amostra, incluindo divisão, britagem, homogeneização e secagem; m) britar a amostra, se necessário, exceto a amostra para distribuição granulométrica; n) secar a amostra, se necessário, exceto a amostra para determinação do teor de umidade; o) dividir as amostras de acordo com a massa mínima da amostra dividida para um dado tamanho máximo nominal, empregando divisão por massa constante ou divisão proporcional para amostragem base massa, ou divisão proporcional para amostragem base tempo; p) preparar a amostra de ensaio.

A projeção de partículas, a contaminação da amostra e a extração incorreta de incrementos são fontes de “vícios” passíveis de serem completamente eliminados na origem por um projeto correto do sistema de amostragem e preparação de amostra, enquanto que as alterações no teor de umidade, perda de poeira e degradação de partículas (para determinação da distribuição granulométrica) são fontes que podem ser minimizadas, mas não completamente eliminadas.

A massa do incremento, m_1 , em quilogramas, a ser coletada (mecânica ou manualmente) por um amostrador primário, tipo cortador, do fluxo no final da descarga de uma correia transportadora é dada por:

$$m_1 = ql_1/3,6vc$$

onde:

q é a taxa de fluxo de minério na correia transportadora, em toneladas por hora;

l_1 é a abertura do cortador do amostrador primário, em metros;

vc é a velocidade do cortador do amostrador primário, em metros por segundo.

Por razões práticas, como no caso do minério mais granulado, pode ser necessário que a abertura do cortador exceda três vezes o tamanho máximo nominal do minério.

O sistema para manuseio dos incrementos primários, do estágio de amostragem primária até o de preparação da amostra em que é para efetuar a distribuição granulométrica ou ensaios físicos, deve ser cuidadosamente projetado para evitar o manuseio brusco da amostra, o que poderia causar sua degradação. O número de pontos de transferências e a altura de queda em cada ponto devem ser mantidos ao mínimo.

O equipamento de preparação de amostra deve ser capaz de britar, moer e pulverizar a amostra, buscando o tamanho de partícula desejado e então dividir a amostra até a massa desejada, sem “vícios”. Os equipamentos de britagem e divisão devem ser apropriadamente isolados para proteger as amostras de corrente de ar excessiva. A circulação de ar através do equipamento também deve ser reduzida ao mínimo, a fim de prevenir perda de materiais finos e umidade. Se for difícil incorporar o equipamento para moagem da amostra a uma granulometria menor que 160 mm ou 100 mm no sistema de preparação de amostra, a operação de moagem pode ser executada separadamente.

Os divisores para redução da massa e adequação aos ensaios, podem ser exemplificados a seguir: tipo chute desviador, tipo correia fendida, tipo caçamba, divisor rotativo, mesa rotativa e divisor de cortador rotativo. É recomendado que uma alimentação uniforme seja providenciada para o divisor, a cada estágio de divisão da amostra.

A norma NBR ISO 4701 (2004) discorre sobre a determinação da distribuição granulométrica por peneiramento. Os principais tópicos abordados a seguir fazem parte do referido procedimento padrão.

A distribuição granulométrica é expressa em termos de massa e porcentagem de massa, passante ou retida nas peneiras selecionadas. A escolha das aberturas das malhas das peneiras será determinada pela abertura de especificação requerida, junto com a necessidade de introdução de peneiras de aberturas intermediárias para satisfazer o

tamanho máximo de partícula e carga especificada para a peneira. O efeito do teor de umidade da amostra para ensaio granulométrico na divisão e peneiramento deve ser determinado antes do início do procedimento. Pode ser desejável secar total ou parcialmente a amostra antes de fazer o peneiramento, dependendo da precisão requerida para o teste. Para o peneiramento a seco, o teor de umidade do material deve ser suficientemente baixo para não introduzir qualquer “vício”. É recomendável o peneiramento a úmido, se existir uma tendência de uma proporção significativa de partículas finas aderirem às partículas maiores, se o minério tiver tendência de agregar durante a secagem, ou se as partículas finas de minério tenderem a se tornarem carregadas com eletricidade estática durante a operação de peneiramento e aderirem fortemente à peneira.

A eficácia do peneiramento a seco depende de: **a)** duração do peneiramento; **b)** força aplicada à batida da peneira; **c)** número de batidas aplicadas à peneira, por minuto (frequência); **d)** direção nas quais as batidas são aplicadas; **e)** amplitude da vibração; **f)** inclinação da tela; **g)** condição de umidade do minério de ferro a ser peneirado. A umidade pode afetar a separação das partículas individuais, a massa de uma partícula e o tamanho das partículas, assim como o fluxo da carga sobre ou através das peneiras.

4 – METODOLOGIA

O sequenciamento da metodologia objetivou estabelecer uma sistemática para as diversas fases do trabalho, buscando definir as rotas mais adequadas para garantir a confiabilidade dos dados da pesquisa tecnológica. O tratamento adequado das informações depende da representatividade das amostras desde os procedimentos de amostragens, preparações, granulometrias, avaliações das tipologias, análises químicas, descrições mineralógicas e ensaios metalúrgicos.

4.1 – Coleta de dados

O fluxograma da figura 4.1 estabelece as fases dos trabalhos, desde a coleta das amostras e as diversas fases dos trabalhos de laboratório empreendidos para a obtenção dos dados utilizados nas interpretações finais.

4.1.1 – Sistemática de amostragem

Os produtos granulados das Minas do Sistema Sul da Vale são comercializados para uso em altos-fornos (LOBF) e redução direta (LORD). A faixa granulométrica comercial está situada entre 31,50 a 6,30 mm.

As amostras representativas desses produtos granulados das minas do Sistema Sul da Vale foram coletadas nas usinas de tratamento de minérios, em um intervalo de tempo de 6 meses, buscando garantir a representatividade da maioria dos tipos de minérios das minas em operação. Os incrementos de amostras foram feitos com amostradores automáticos, levando em consideração a base massa produzida. Os incrementos de amostras com peso aproximado de 10 kg foram coletados a cada 30 toneladas de produção, compondo uma amostra global a cada turno de 6 horas. A massa final no intervalo de tempo considerado foi de 500 a 700 kg. No final de cada mês foram feitos

quarteamentos padronizados, reduzindo a massa total, sem perder a representatividade das alíquotas coletadas.

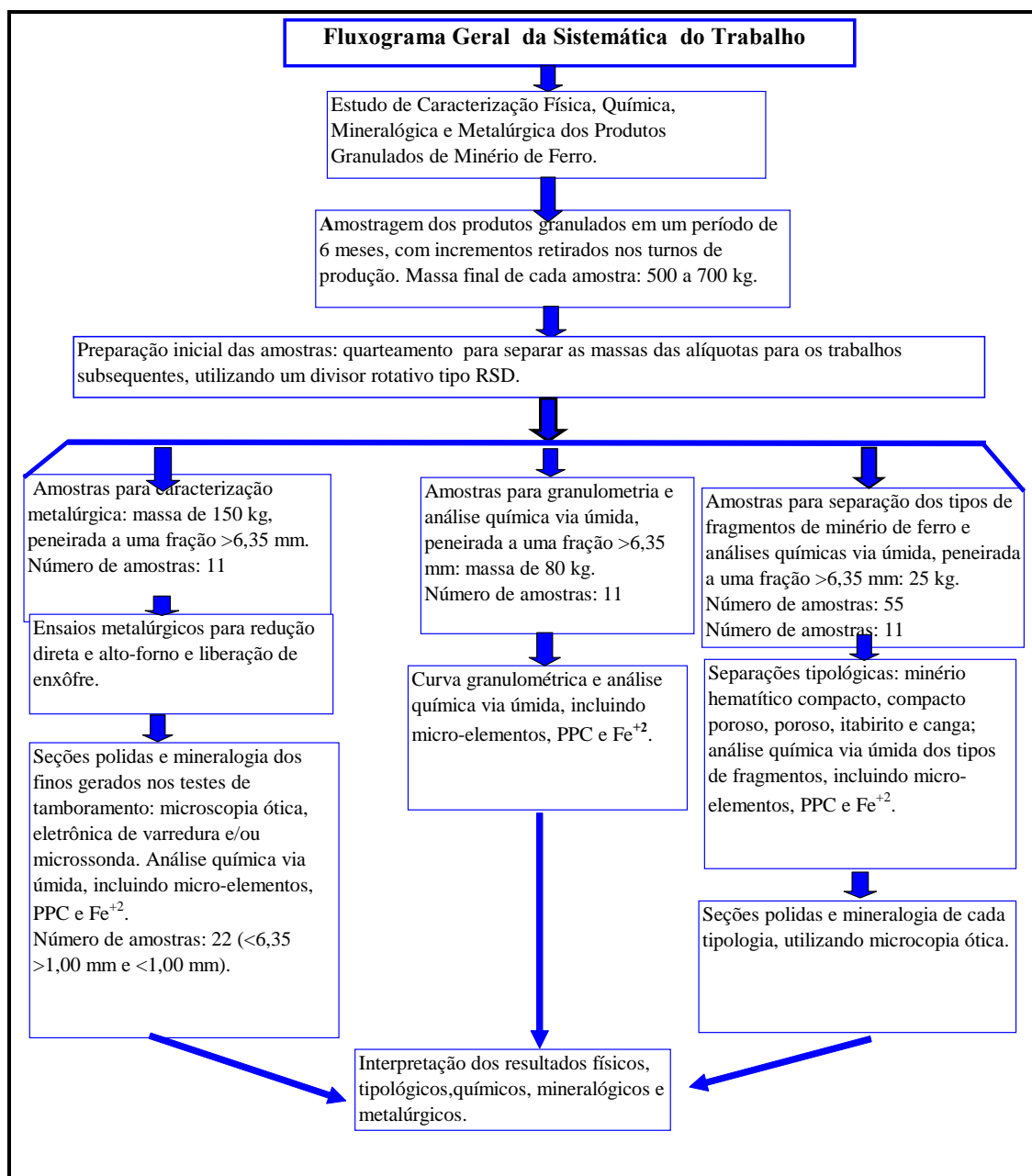


Figura 4.1 – Fluxograma dos trabalhos de pesquisa desde a coleta das amostras até os ensaios de laboratório, enfatizando os testes físicos, metalúrgicos, químicos, tipológicos e mineralógicos.

Os amostradores automáticos cortam perpendicularmente o fluxo do produto, incluindo a água de lavagem que contém os finos situados na faixa < 6,30 mm (figuras 4.2 e 4.3).



Figura 4.2 – Amostragem automática dos produtos granulados, sendo o fluxo de material na correia transportadora cortado integralmente pelo amostrador.



Figura 4.3 – Detalhe da amostragem automática dos granulados.

4.1.2 – Preparação inicial das amostras

A partir de uma massa inicial com média de 600 kg, é iniciada a primeira fase da preparação das amostras, utilizando um divisor rotativo para dividir e separar as sub-amostras que serão utilizadas nos testes subseqüentes. É necessário efetuar uma homogeneização adequada da amostra inicial, objetivando garantir alíquotas com baixa variabilidade química e física, embora os produtos granulados de minério de ferro tenham um comportamento naturalmente heterogêneo, pela ampla faixa granulométrica das partículas situadas entre 31,50 e 6,30 mm (figura 4.4).

A partilha (ou a divisão) da massa inicial da amostra tem como objetivo principal separar as alíquotas que serão utilizadas nos processos subseqüentes, sem perda da representatividade da amostra (figura 4.5).



Figura 4.4 – Preparação inicial de amostras com massa de 600 kg.



Figura 4.5 – Divisão (ou partilha) inicial da amostra em um sistema com sub-divisões que objetivam preservar a representatividade inicial da amostra.

4.1.3 – Ensaio granulométrico

Para avaliar a distribuição granulométrica dos produtos granulados, são feitos ensaios de peneiramento, considerando uma massa inicial de 80 kg, utilizando as seguintes peneiras, com malha em milímetros: 50; 45; 37,5; 31,5; 25; 19; 12,5; 9,5; 8; 6,3. Em termos gerais o percentual de material acima de 31,5 mm e abaixo de 6,3 mm são considerados, respectivamente, como “over size” e “under size”, pois representam as faixas de controle comercial dos produtos, bem como uma avaliação do desempenho operacional de sistema de peneiramento e de britagem (figuras 4.6 e 4.7)



Figura 4.6 – Peneiramento das amostras nas faixas granulométricas padronizadas.



Figura 4.7 – Detalhe do peneiramento inicial na tela de 31,50 mm.

4.1.4 – Avaliação das tipologias presentes nas amostras

Durante a fase de preparação, é separado, inicialmente, em torno de 25 kg de material para a descrição tipológica, que consiste na partilha, peneiramento e separação dos tipos de fragmentos de material nas faixas granulométricas, para avaliar quantitativamente e qualitativamente os litotipos presentes em cada amostra de produto granulado. Além do uso da lupa de bolso, alguns tipos de fragmentos requerem a utilização de lupa binocular, para identificar com melhor precisão as tipologias dos minérios granulados (figura 4.8).

Os principais tipos de fragmentos descritos são denominados como: hematítico compacto (CO); hematítico compacto-poroso (CP); hematítico poroso (PO); canga (CG) e itabirito (IB). As figuras 4.9 a 4.13 representam os tipos de fragmentos das tipologias descritas e detalhadas nas análises posteriores de laboratório.

A caracterização tipológica é fundamental para diferenciar os granulados provenientes das diferentes minas em operação, principalmente os produtos destinados para alto-forno (LOBF) e redução direta (RD).



Figura 4.8 – Sistemática da separação tipológica dos fragmentos de minérios granulados, nas diversas faixas granulométricas, com auxílio de lupa de bolso e binocular.



Figura 4.9 – Tipologia dos minérios compactos.



Figura 4.10 – Tipologia dos minérios compactos porosos.



Figura 4.11 – Tipologia dos minérios porosos.



Figura 4.12 – Tipologia dos minérios itabiríticos.



Figura 4.13 – Tipologia dos minérios associados à canga, muito alterados.

4.1.5 – Análises químicas

As análises químicas pelo método via úmida foram feitas nas amostras iniciais, para obtenção dos teores médios e também nas amostras tipológicas, visando identificar diferenças significativas dos tipos de fragmentos. Também foram analisados os finos

gerados pelos testes de tamboramento, buscando informações importantes do material cominuído nos testes de resistência mecânica. Na tabela IV.1 constam os elementos maiores e menores analisados nas amostras. Também foram feitas análises dos elementos zinco, sódio e potássio, pois dependendo dos teores, tem efeitos danos na siderurgia. O anexo número1 sumaria a metodologia de laboratório para execução das análises químicas via úmida.

Tabela IV.1 – Tabela dos elementos químicos analisados via úmida, incluindo o fechamento químico estequiométrico.

FeTot.	SiO₂	Al₂O₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO₂	S	V	Cr	Ni	Cu	Zn
Ba	FeO	PPC	Fechamento químico estequiométrico										

Também foram feitas análises químicas dos elementos sódio e potássio nas amostras dos produtos, complementando as informações para interpretação dos resultados.

4.1.6 – Descrições mineralógicas

O detalhamento mineralógico das principais tipologias objetivou complementar as análises químicas e os ensaios metalúrgicos. Na figura 4.14 encontram-se as denominações dos minerais descritos nas assembléias mineralógicas.

A partir da caracterização mineralógica foram feitas considerações sobre a metalurgia, ampliando a compreensão dos resultados metalúrgicos das amostras, bem como algumas considerações genéticas das tipologias presentes nas amostras.

As amostras para estudo no microscópio óptico foram utilizadas na forma de seções polidas, confeccionadas a partir de material granulado, com fragmentos médios em

torno de 15 mm, para cada uma das amostras; em alguns casos também foram estudadas as frações granulométricas mais finas. Utilizou-se sempre luz refletida, simplesmente polarizada e também com nicóis semicruzados. Este estudo permitiu a identificação das fases e feições mineralógicas presentes nas amostras, a determinação da porcentagem dessas feições e a caracterização das microestruturas, incluindo-se uma avaliação dos tamanhos e distribuição dos poros. O microscópio óptico que foi utilizado é da marca Leitz/Leica, modelo Orthoplan Pol, com câmera digital Canon PowerShot S80 acoplada. Os estudos de microscopia óptica foram sempre registrados por fotomicrografias.


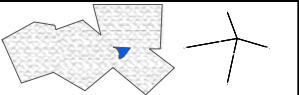

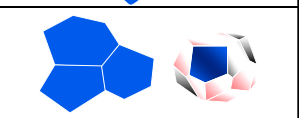
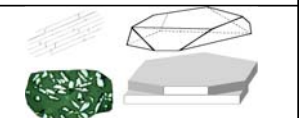
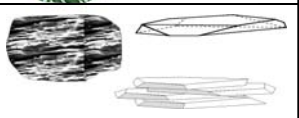


	1 – Magnetita
	2 – Martita
	3 – Hematita Sinuosa
	4 – Hematita Granular <i>Relação comp./largura < 2</i>
	5 – Hematita Lamelar <i>Relação comp./largura >2 e <5</i>
	6 – Hematita Especular <i>Relação comp./largura > 5</i>
	7 – Goethita
	8 – Agregado Terroso

Figura 4.14 – Padrão de denominação dos minerais descritos nas seções polidas.

4.1.7 – Ensaios metalúrgicos e finos gerados pelos ensaios de tamboramento

Na tabela IV.2 constam os ensaios metalúrgicos das amostras dos produtos granulados, tendo sido utilizadas como base as normas internacionais ISO.

A caracterização metalúrgica busca simular o comportamento dos produtos granulados no processo siderúrgico. Os testes metalúrgicos foram feitos para alto-forno e redução direta, buscando mensurar as principais diferenças dos produtos que estão sendo estudados. Os finos gerados pelos ensaios de tamboramento foram separados por peneiramento em duas frações granulométricas (maior e menor que 1,00 mm), buscando avaliar diferenças importantes através das análises químicas, descrições mineralógicas e percentuais granulométricos (tabela IV.3). As necessidades práticas do estudo dos finos gerados pelos ensaios de tamboramento e abrasão provêm de reclamações comerciais de clientes, onde os finos atuam como agregantes das partículas maiores, promovendo uma espécie de “colamento”, reduzindo a eficiência na descarga e manuseio em geral dos produtos granulados (“sticking”).

Tabela IV.2 – Testes metalúrgicos dos produtos granulados.

Midrex Linder Test	Liberação Enxofre	Redutibilidade	RDI	Crepitação	Tamboramento

Observações sobre os testes metalúrgicos: Midrex Linder Test: grau de metalização e finos gerados; liberação de enxofre em ppm; redutibilidade (% redução); RDI (% <2,80 mm); crepitação (<4,75 e <6,30 mm); tamboramento (TI: >6,30 mm e AI: <0,50 mm).

Tabela IV.3 – Separação dos finos gerados pelos ensaios de tamboramento.

Finos gerados nos ensaios de tamboramento	Fração (mm)
	<6,30 >1,00
	<1,00

5 – RESULTADOS OBTIDOS, DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO

Os resultados obtidos nas diversas fases da pesquisa são discutidos e interpretados nos próximos itens descritos. Inicialmente, serão feitas interpretações individuais nos tópicos 5.1 a 5.5. No item 5.6, serão feitas correlações de todas as variáveis estudadas, focando a busca do melhor entendimento dos resultados obtidos na caracterização metalúrgica. No item 5.7 serão avaliados os resultados obtidos no tratamento das frações finas separadas a partir dos ensaios de tamboramento. No anexo número 2 estão detalhadas as 11 amostras, incluindo as avaliações das distribuições tipológicas.

5.1 – Caracterização granulométrica dos produtos granulados

Durante os procedimentos de amostragens nas usinas de tratamento de minérios, não foi levado em consideração às aberturas dos britadores primários, secundários e terciários, que estão adequadas aos tipos de minérios processados nas diferentes minas. Diferentes aberturas nos britadores interferem nas distribuições granulométricas dos produtos granulados finais.

Na tabela V.1 e figura 5.1 estão representadas as distribuições granulométricas de frequência simples das 11 amostras objeto do estudo de caracterização tecnológica.

Tabela V.1 – Distribuições granulométricas de frequência simples.

% Retida simples	Amostras e % Granulométricos											Média
	LOJGD	LOCMT	LOTAM	LOVGR	LOABO	LOPIC	LOCFX	PO A PIC	PO B PIC	LO B PIC	LO ITA PIC	
> 37.50			0,13		1,94	7,68	0,50					0,93
> 31.50	2,53	0,77	1,40	2,75	4,65	7,25	5,03	2,13	9,45	0,58	6,01	3,87
> 25.00	41,10	20,41	16,73	25,27	21,27	23,42	22,83	17,37	19,29	11,28	13,11	21,10
> 19.00	42,08	22,38	15,84	32,73	29,74	34,30	23,40	43,40	35,87	30,93	21,97	30,24
> 12.50	12,86	22,01	19,66	30,67	24,08	17,89	29,59	23,47	22,77	34,76	21,55	23,57
> 9.50	0,80	15,95	15,08	5,52	11,69	6,32	10,16	7,31	8,02	15,21	16,64	10,24
> 8.00	0,30	9,64	14,75	1,66	4,28	2,06	5,26	3,37	2,79	4,76	12,84	5,61
> 6.30	0,32	8,84	16,40	1,41	2,35	1,09	3,23	2,95	1,80	2,49	7,89	4,43
TMP - tam. Médio partícula	23,90	17,57	15,89	20,94	20,44	23,28	19,94	20,16	21,40	17,86	17,44	19,89

OBS: TMP-Tamanho médio de partícula (mm), calculado com base nas médias dos tamanhos das faixas granulométricas.

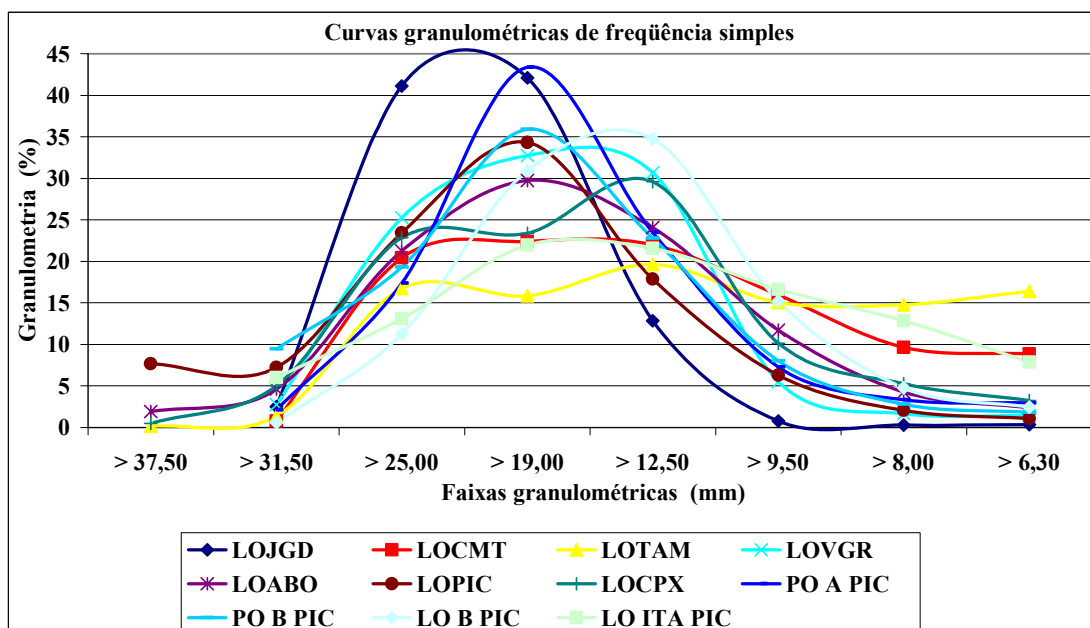


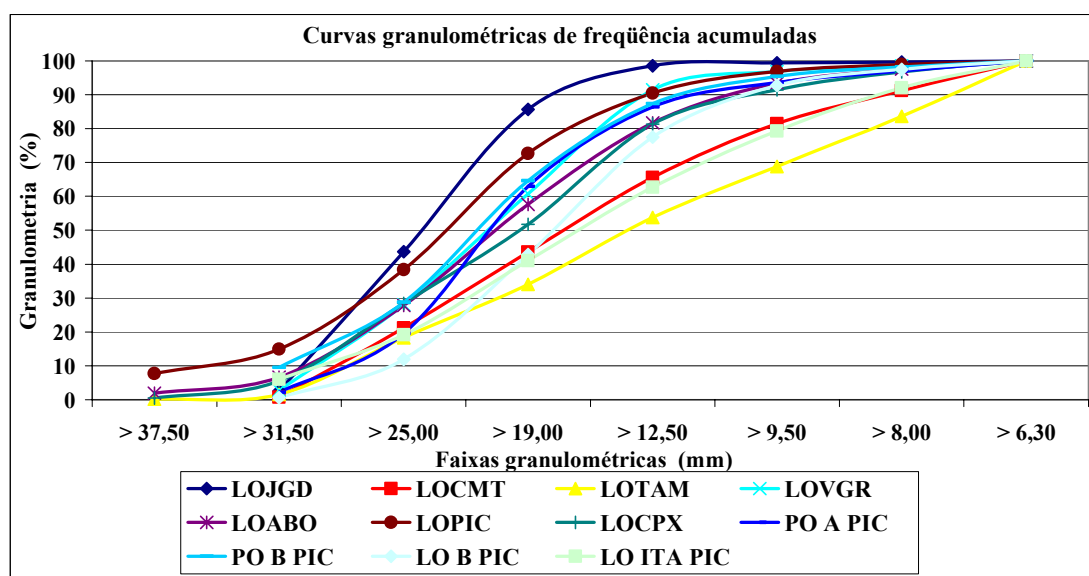
Figura 5.1 – Curvas de distribuições granulométricas de frequência simples.

Em apenas quatro amostras foi peneirado material com granulometria superior à 37,50 mm. Os maiores quantitativos estão distribuídos entre as faixas < 31,50 mm e >12,50 mm, condizente com as especificações dos produtos, principalmente para aumentar o rendimento nos processos siderúrgicos de redução direta e alto-forno. A fração < 25 mm e > 19,00 mm concentra a maior parte do material, com média de 30,24%. A segunda faixa com maior quantitativo de material está entre 19,00 mm e 12,50 mm, com média de 23,57%.

Na tabela V.2 e na figura 5.2 estão representadas as distribuições granulométricas de frequência acumuladas, ressaltando a concentração nas frações granulométricas ressaltadas no parágrafo anterior. A amostra do LOJGD apresenta o maior percentual de material nas frações intermediárias (< 31,50 > 12,50 mm), pelo predomínio de minério mais compacto na jazida, havendo uma dificuldade natural na cominuição do material por britagem, gerando baixo percentual de material fino.

Tabela V.2 – Distribuições granulométricas de frequência acumuladas.

% Retida acumulada	Amostras e % Granulométricos											
	LOJGD	LOCMT	LOTAM	LOVGR	LOABO	LOPIC	LOCPX	PO A PIC	PO B PIC	LO B PIC	LO ITA PIC	Média
> 37,50			0,13		1,94	7,68	0,50					0,93
> 31,50	2,53	0,77	1,53	2,75	6,58	14,93	5,52	2,13	9,45	0,58	6,01	4,80
> 25,00	43,63	21,18	18,26	28,02	27,85	38,35	28,36	19,50	28,74	11,86	19,12	25,90
> 19,00	85,71	43,56	34,10	60,74	57,59	72,65	51,75	62,90	64,62	42,79	41,09	56,14
> 12,50	98,57	65,57	53,76	91,41	81,67	90,54	81,35	86,37	87,39	77,55	62,64	79,71
> 9,50	99,37	81,52	68,85	96,93	93,37	96,85	91,51	93,68	95,41	92,75	79,27	89,96
> 8,00	99,68	91,16	83,60	98,59	97,65	98,91	96,77	97,05	98,20	97,51	92,11	95,57
> 6,30	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

**Figura 5.2** – Curvas de distribuições granulométricas de frequência acumuladas.

As amostras com percentuais mais baixos nas frações entre 31,50 e 12,50 mm (LOTAM, LOCMT) também foram geradas de duas minas onde os minérios compactos são comuns, mas em percentuais inferiores à amostra LOJGD. Os métodos de britagens são diferentes, e pode ter influenciado na diferenciação significativa das curvas granulométricas.

As amostras de LOITAPIC e LOBPIC são provenientes de minérios com forte contribuição de itabiritos, com predomínio de materiais mais friáveis, portanto com menor resistência mecânica. O sistema de britagem gera maior quantidade de finos, pela menor resistência mecânica do minério mais silicoso.

Na figura 5.3 estão representados os tamanhos médios ponderados das partículas (TMP) das amostras objeto da tese, calculados com base nos percentuais granulométricos de cada intervalo e os tamanhos médios de cada faixa.

Os resultados localizados na parte mediana da curva dos tamanhos médio das partículas estão associados a minérios hematíticos de consistência média a macia, incluindo itabiritos ricos friáveis. Os minérios compactos também fazem parte dos tipos de minérios processados, mas em percentuais mais baixos, quando relacionados à amostra LOJGD.

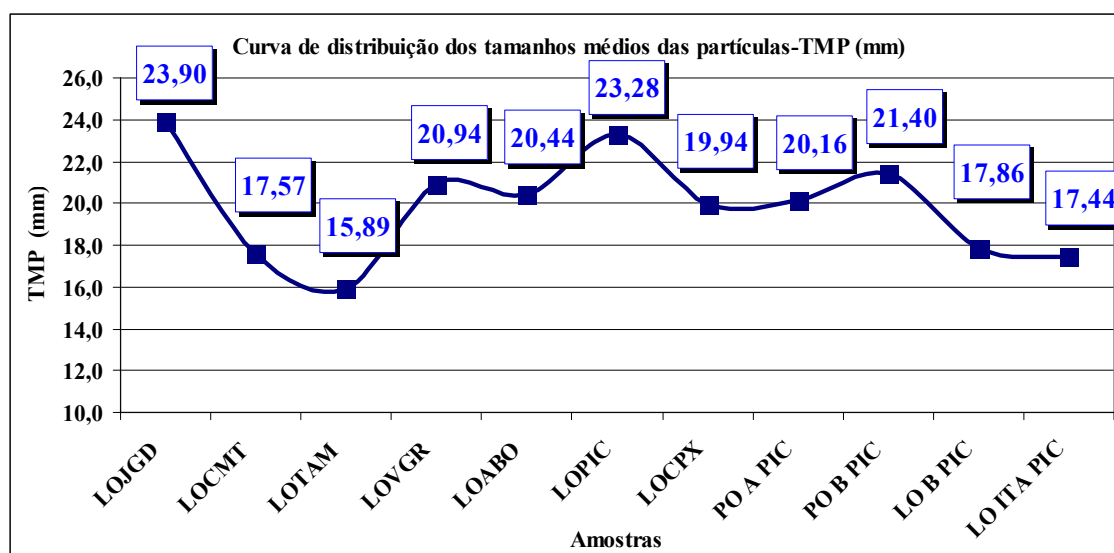


Figura 5.3 – Curva de distribuição dos tamanhos médios das partículas das curvas granulométricas das amostras.

5.2 – Caracterização química dos produtos granulados

Os resultados das análises químicas pelo método via úmida representam os teores das amostras médias dos produtos e das unidades tipológicas separadas durante os ensaios granulométricos (vide anexo 3).

As figuras 5.4 a 5.9 representam as correlações mais significativas das variáveis químicas, onde estão incluídas as análises dos produtos e as amostras das tipologias. No

gráfico da figura 5.4 é visualizada uma forte correlação negativa entre as variáveis ferro total e sílica. Quanto mais elevados os teores de sílica, associados a minérios hematíticos silicosos e itabiríticos, menores os teores de ferro total e quanto mais hematíticos, menores os teores de sílica. As duas variáveis químicas são inversamente proporcionais.

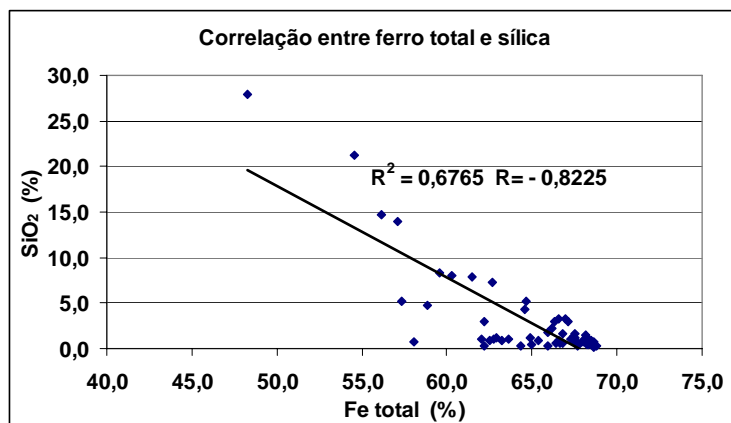


Figura 5.4 – Fator de correlação negativo entre as variáveis químicas sílica e ferro total.

Na figura 5.5 está representada uma forte correlação positiva entre os teores de alumina e perda ao fogo (PPC). A presença de minerais hidratados, originados pela alteração, geralmente associados às argilas, é determinante para a correlação diretamente proporcional entre as duas variáveis.

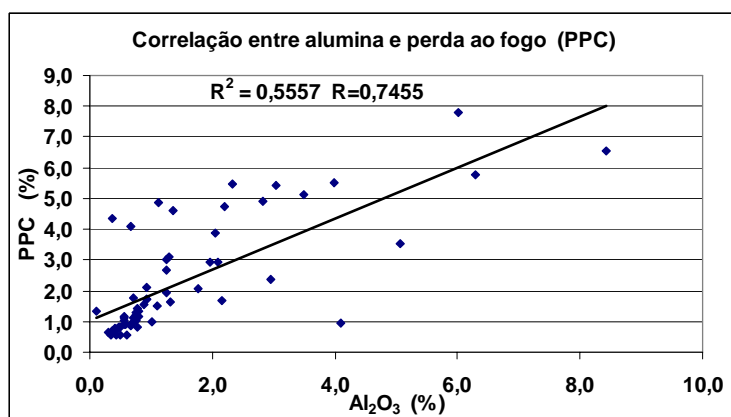


Figura 5.5 – Fator de correlação positivo entre as variáveis alumina e perda ao fogo (PPC).

As variáveis químicas manganês e magnésio também são diretamente proporcionais, associados geneticamente a carbonatos magnesianos e manganesíferos, comuns nas porções basais e no topo dos grandes depósitos de ferro das formações ferríferas bandadas (figura 5.6).

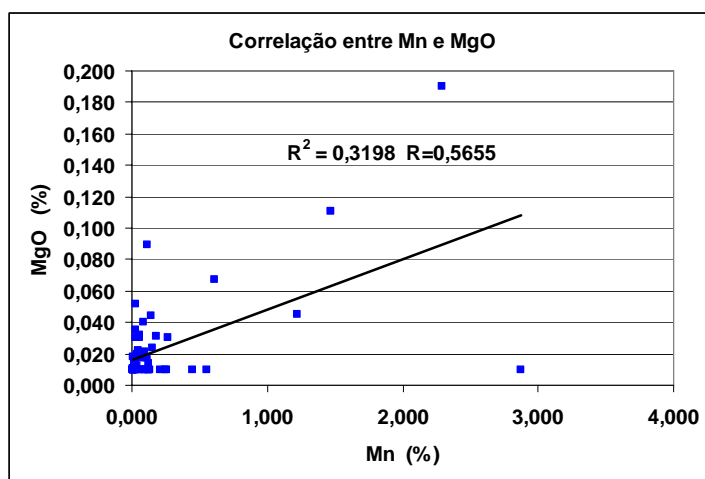


Figura 5.6 – Fator de correlação positivo entre as variáveis manganês e magnésio.

As variáveis ferro total e alumina são inversamente proporcionais, semelhante à correlação da sílica (figura 5.7). A alumina está associada ao intemperismo das formações ferríferas, proporcionando reações de substituições do Fe^{+3} pelo Al^{+3} .

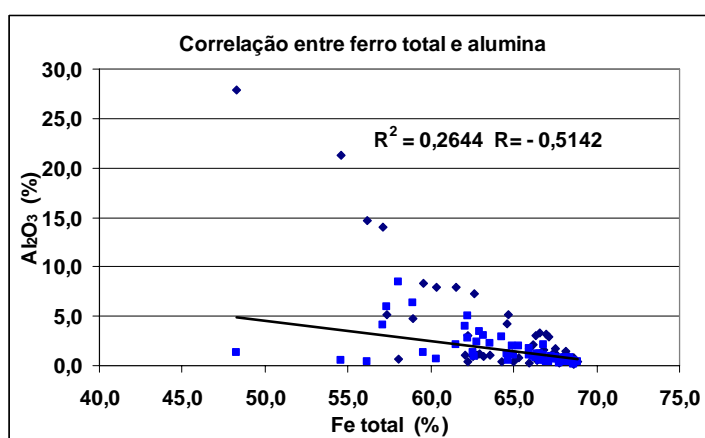


Figura 5.7 – Fator de correlação negativo entre as variáveis alumina e ferro total.

As variáveis cálcio e magnésio são diretamente proporcionais, reforçando a afinidade geoquímica correlacionável às porções carbonatadas das formações ferríferas bandadas (figura 5.8).

As variáveis químicas manganês e cálcio também são diretamente proporcionais, atestando a afinidade geoquímica carbonatada, mas o fator de correlação é baixo (figura 5.9).

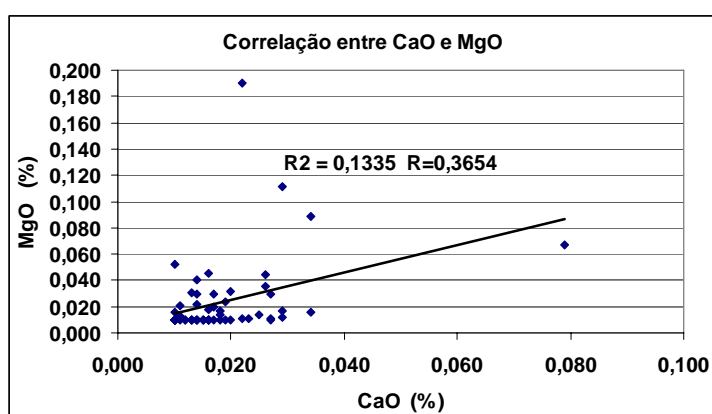


Figura 5.8 – Fator de correlação positivo entre as variáveis químicas cálcio e magnésio, significando uma forte afinidade geoquímica carbonatada.

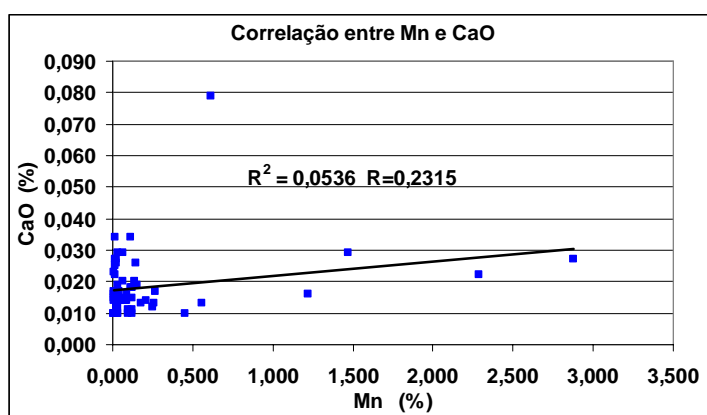


Figura 5.9 – Fator de correlação positivo entre as variáveis químicas manganês e cálcio, associada a carbonatos.

As variáveis ferro total ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) e FeO apresentam uma fraca correlação negativa, decorrente da oxidação do elemento Fe^{+2} para Fe^{+3} durante os eventos supergênicos de

alteração da formação ferrífera, ocasionando recristalizações dos minerais primários (figura 5.10).

As variáveis químicas alumina e fósforo são diretamente proporcionais, embora o fator de correlação seja baixo. Representa os processos de alteração supergênica, principalmente nas porções superiores das formações ferríferas e zonas de fraturas, onde ocorre alteração preferencial por percolação de fluídos (figura 5.11). Em condicionamentos geológicos mais particulares, o fósforo está associado à hidrotermalismo e sedimentação primária associado aos minerais wavellita e apatita, respectivamente.

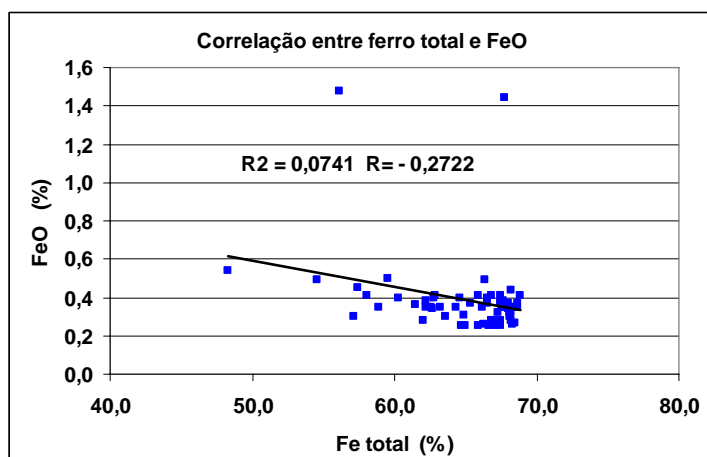


Figura 5.10 – Fator de correlação negativo entre as variáveis ferro total e FeO.

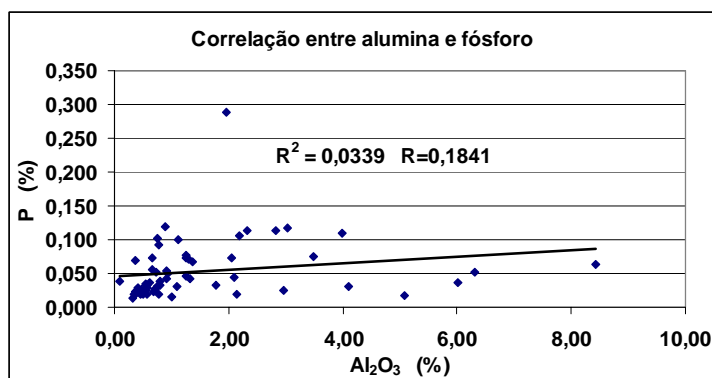


Figura 5.11 – Fator de correlação levemente positivo entre as variáveis alumina e fósforo, mostrando ação intempérica na elevação dos teores, embora a correlação seja baixa e seja apenas uma tendência.

As variáveis químicas manganês e titânio apresentam uma fraca correlação negativa, sendo inversamente proporcionais. A causa mais provável deve estar associada à sedimentação primária, onde a concentração dos dois elementos foi diferenciada por associações às áreas fontes ou mudanças no ambiente geoquímico de sedimentação (figura 5.12).

Os elementos zinco, sódio e potássio são nocivos aos processos siderúrgicos. Foram feitas análises químicas nos produtos, objetivando avaliar essas variáveis críticas (tabela V.3).

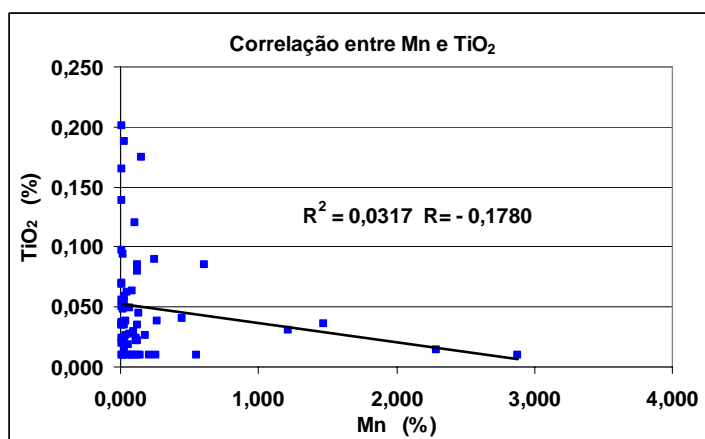


Figura 5.12 – Fator de correlação negativo entre as variáveis químicas manganês e TiO₂.

Tabela V.3 – Análises químicas dos elementos zinco, sódio e potássio e correlação Na/K.

Amostras Produtos	Teores (%)			Relação Na/K
	Zn	Na	K	
LO JGD	0,001	0,004	0,003	1,333
LO CMT	0,001	0,007	0,014	0,500
LO TAM	0,004	0,005	0,011	0,455
LO VGR	0,001	0,006	0,013	0,462
LO ABO	0,001	0,004	0,019	0,211
LO PIC	0,010	0,004	0,011	0,364
LO CPX	0,009	0,004	0,005	0,800
PO A PIC	0,001	0,005	0,012	0,417
PO B PIC	0,010	0,004	0,014	0,286
LO B PIC	0,010	0,006	0,016	0,375
LO ITA PIC	0,010	0,007	0,012	0,583
Média Aritmética	0,005	0,005	0,012	0,526

Os gráficos das figuras 5.13 e 5.14 representam as distribuições dos baixos teores analisados, incluindo a relação sódio/potássio.

A relação sódio/potássio média é de 0,526. As relações das amostras LOJGD e LOCPX são atípicas, sendo os teores de sódio e potássio muito próximos. Na maioria das amostras os teores dos dois elementos são diferentes, razão pelas quais as relações estão próximas da média.

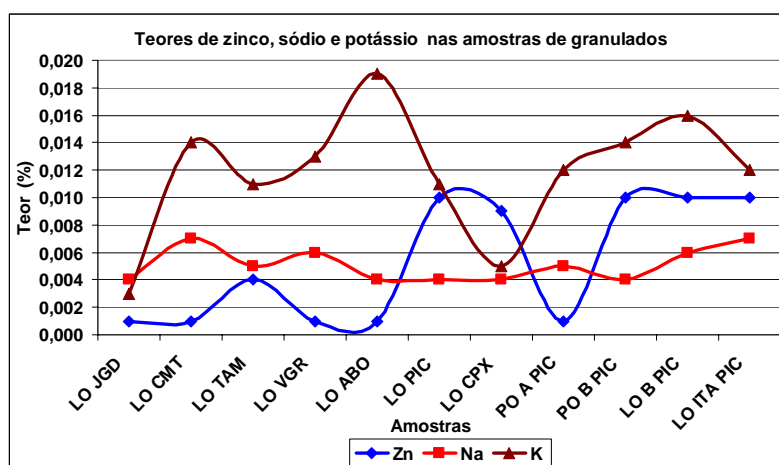


Figura 5.13 – Distribuição dos teores médios de zinco, sódio e potássio, nas amostras dos produtos.

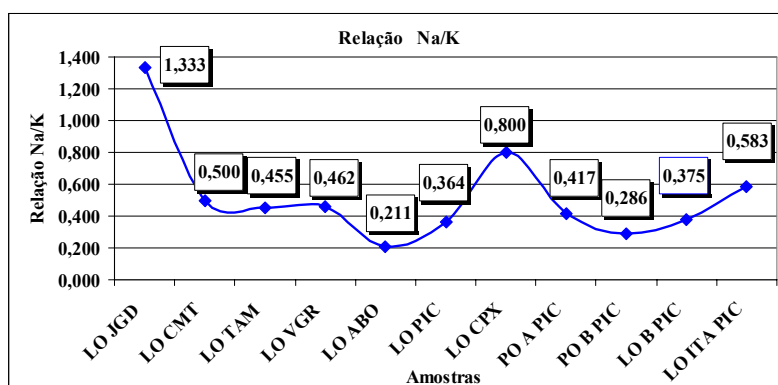


Figura 5.14 – Gráfico das relações sódio/potássio nas amostras dos produtos. As amostras LOJGD e LOCPX apresentam relações mais elevadas, pela proximidade dos teores de sódio e potássio.

A figura 5.15 representa os teores médios de ferro total ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) nas amostras dos produtos. A amostra de LOCPX apresentou teor mais baixo de ferro, pelos altos percentuais de alumina e perda ao fogo (PPC). As análises químicas de ferro total das amostras dos produtos POAPIC, POBPIC, LOBPIC e LOITAPIC, foram mais baixas pela associação com itabiritos (sílica mais elevada) e teores mais altos de alumina e perda ao fogo (PPC).

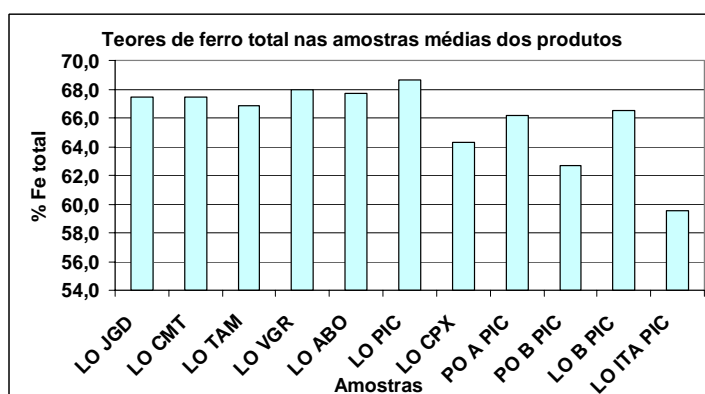


Figura 5.15 – Teores de ferro total nas amostras médias dos produtos.

O teor médio de FeO é de 0,36%. A amostra LOJGD apresentou um teor mais baixo que a média (0,25%) e a amostra de LOITAPIC apresentou um teor mais elevado (0,50%). Em termos gerais, os baixos teores de FeO podem ser interpretados como baixos percentuais do mineral magnetita nos minérios do Quadrilátero Ferrífero (figura 5.16).

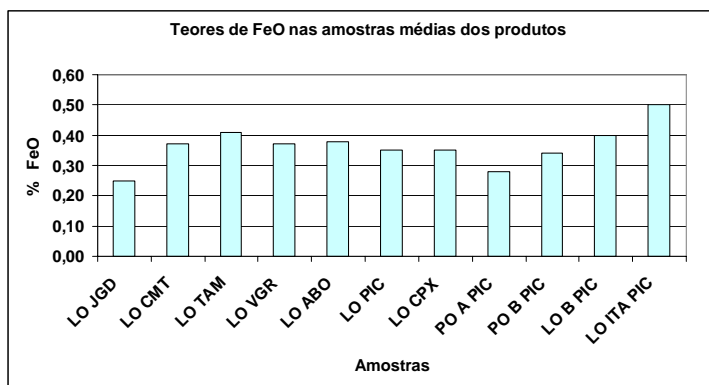


Figura 5.16 – Teores de FeO nas amostras médias dos produtos.

Os teores de sílica são mais elevados nos produtos associados a itabiritos (POAPIC, POBPIC e LOITAPIC). Os teores médios das outras amostras de produtos estão abaixo de 1,70% (figura 5.17).

Os teores de alumina são mais elevados nas amostras de LOCPX, LOBPIC e LOITAPIC. A principal característica química do LOCPX é os altos teores de alumina, associados à argilas derivadas de carbonatos alterados por supergênese (figura 5.18).

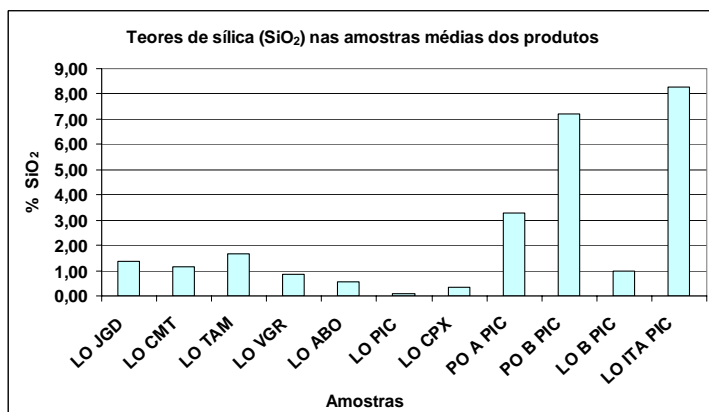


Figura 5.17 – Teores de sílica nas amostras médias dos produtos.

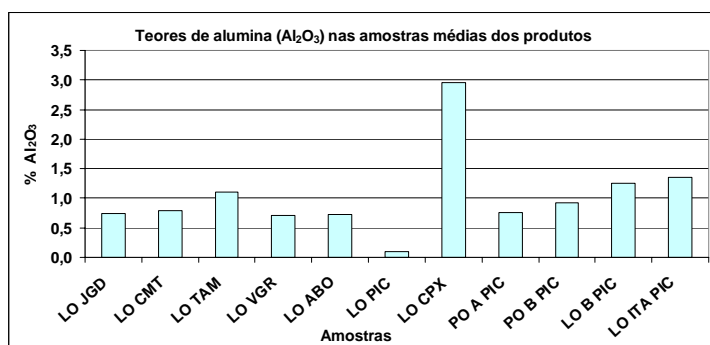


Figura 5.18 – Teores de alumina nas amostras médias dos produtos.

Os teores médios de fósforo estão abaixo de 0,070%. O teor da amostra LOJGD está elevado, pela associação com minerais de gênese hidrotermal, como a wavellita, constituindo-se na principal característica química da jazida (figura 5.19).

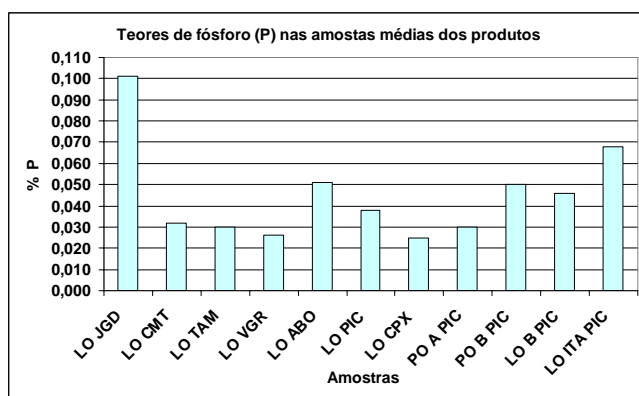


Figura 5.19 – Teores de fósforo nas amostras médias dos produtos.

Os teores de fósforo mais elevados nas amostras LOABO, POBPIC, LOBPIC e LOITAPIC, se devem à associação com minerais de alteração, principalmente goethita.

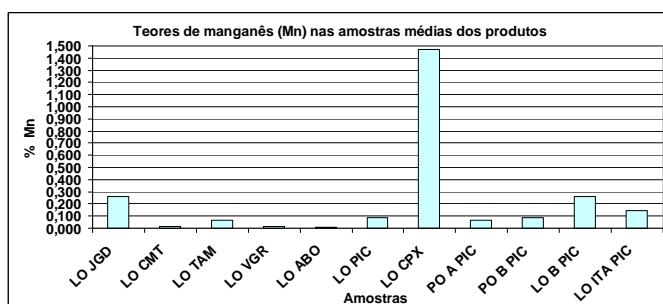


Figura 5.20 – Teores médios de manganês nas amostras dos produtos.

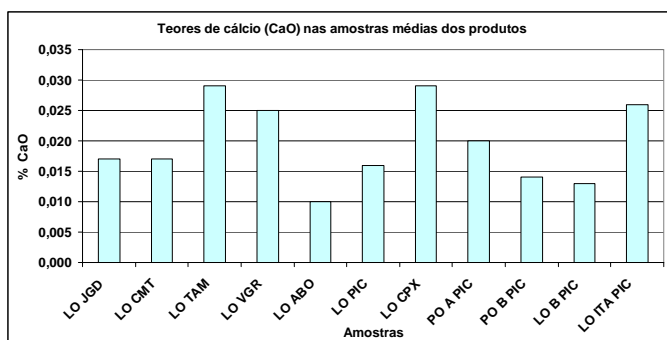


Figura 5.21 – Teores médios de cálcio nas amostras médias dos produtos.

Em termos da variável manganês, os teores médios estão abaixo de 0,300%, exceto a amostra do LOCPX, que é uma característica da jazida. A associação com carbonatos, com percentuais mais elevados de cálcio e magnésio, é a principal causa da anomalia (figuras 5.20, 5.21 e 5.22).

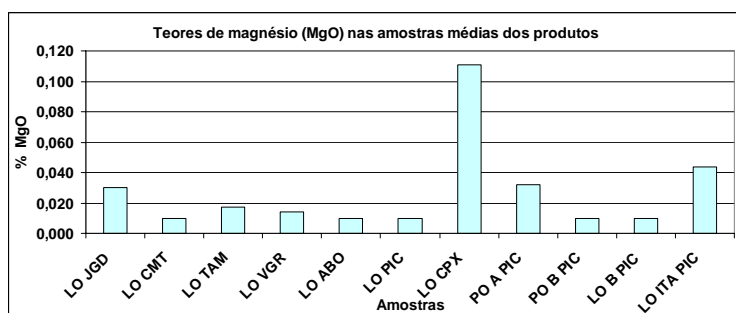


Figura 5.22 – Teores médios de magnésio nas amostras médias dos produtos.

Os teores médios de cálcio apresentam baixa variabilidade, encontrando-se bem distribuídos em todas as amostras, sendo interpretado como uma característica generalizada das jazidas estudadas.

Os teores médios de titânio são baixos, exceto na amostra LOABO. Pode existir associação com rochas básicas e a alteração supergênica concentrou o elemento no minério mais superficial (figura 5.23).

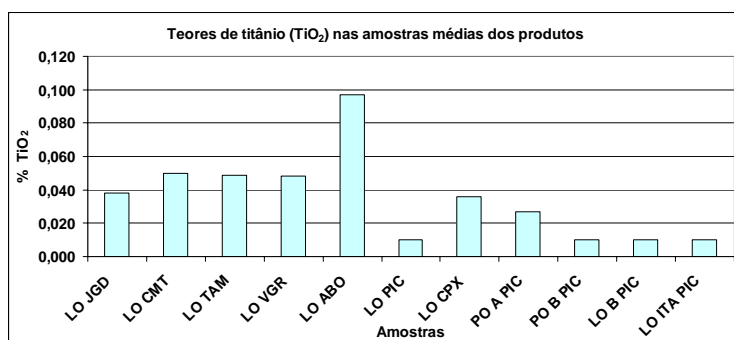


Figura 5.23 – Teores médios de titânio nas amostras médias dos produtos.

A perda por calcinação (PPC) é mais elevada nas amostras onde os minérios estão associados às argilas e canga superficial, sendo os teores situados cima de 1,50% (figura 5.24).

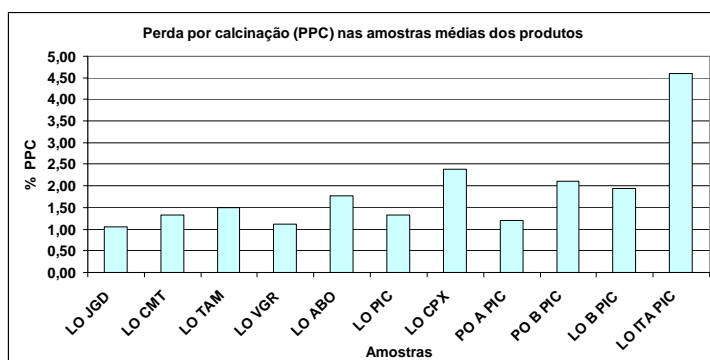


Figura 5.24 – Percentuais médios de perda por calcinação (PPC) nas amostras médias dos produtos.

5.3 – Caracterização tipológica dos produtos granulados

O estudo de caracterização tipológica objetivou o conhecimento das características intrínsecas dos produtos granulados de minério de ferro, desmembrando e analisando as principais tipologias separadamente e avaliando o impacto de cada uma no produto.

A figura 5.25 sistematiza os percentuais das distribuições das tipologias nas amostras de produtos granulados (vide anexos 2 e 3).

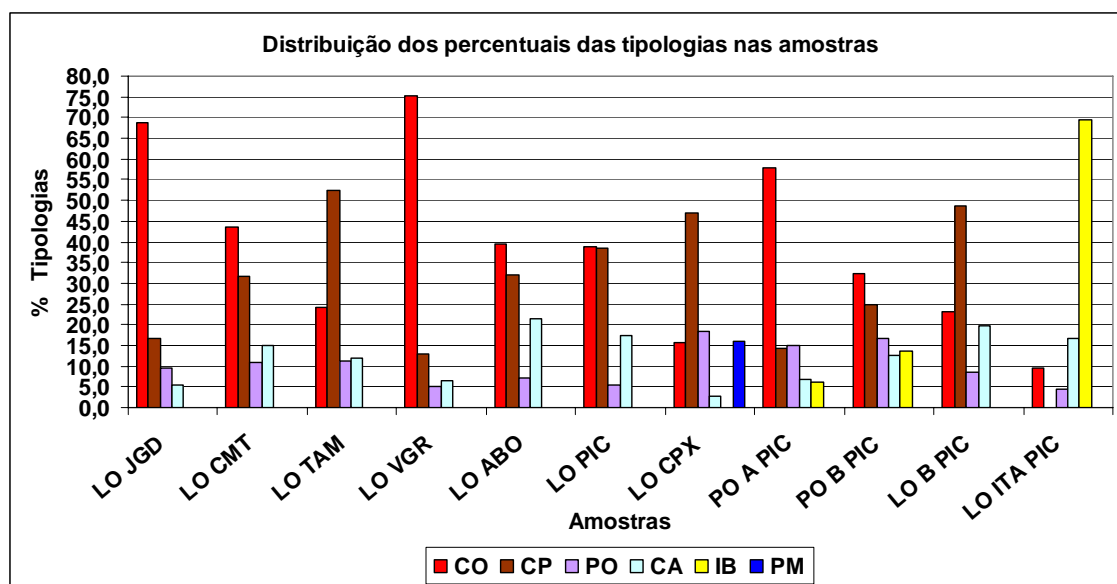


Figura 5.25 – Distribuição dos percentuais das tipologias nas amostras estudadas.

As tipologias denominadas de compactas (CO) e compactas porosas (CP) predominam nas amostras, exceto na amostra LOITAPIC, formada na grande maioria por itabiritos (IB). Na amostra LOCPX foi descrita uma tipologia especial, associada (PM) associada a proto-minério carbonático, onde parte da rocha matriz está preservada, pelos eventos incompletos de alteração supergênica. As tipologias porosas estão representadas em percentuais mais baixos, associadas ao processo de alteração supergênica, onde o proto-minério foi enriquecido. A canga representa alteração superficial das litologias, comuns na abertura das minas de minério de ferro, ou presentes em fraturas mais profundas, onde o processo de alteração ocorreu por percolação de fluídos. Os fragmentos de itabiritos representam o enriquecimento parcial dos proto-minérios compactos silicosos primários, sendo comuns em áreas onde predominam minérios hematíticos friáveis silicosos ou minérios itabiríticos sem intercalações hematíticas.

Na figura 5.26 estão representados os teores médios de ferro total ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$). Os teores mais elevados de ferro total estão associados às tipologias compactas e compactas porosas. A amostra LOITAPIC é uma exceção, pois é composta por itabiritos com consistência macia e média. A concentração maior de ferro total nas tipologias compactas e compactas porosas resultam de uma gênese diferenciada, quando relacionadas às tipologias porosas, que foram geradas a partir do enriquecimento

supergênico mais recente. Os hematitos compactos possuem características hipogênicas, vinculados a um enriquecimento sedimentar primário, ou concentração em zonas de charneiras de estruturas dobradas, portanto formados em eventos geológicos mais antigos.

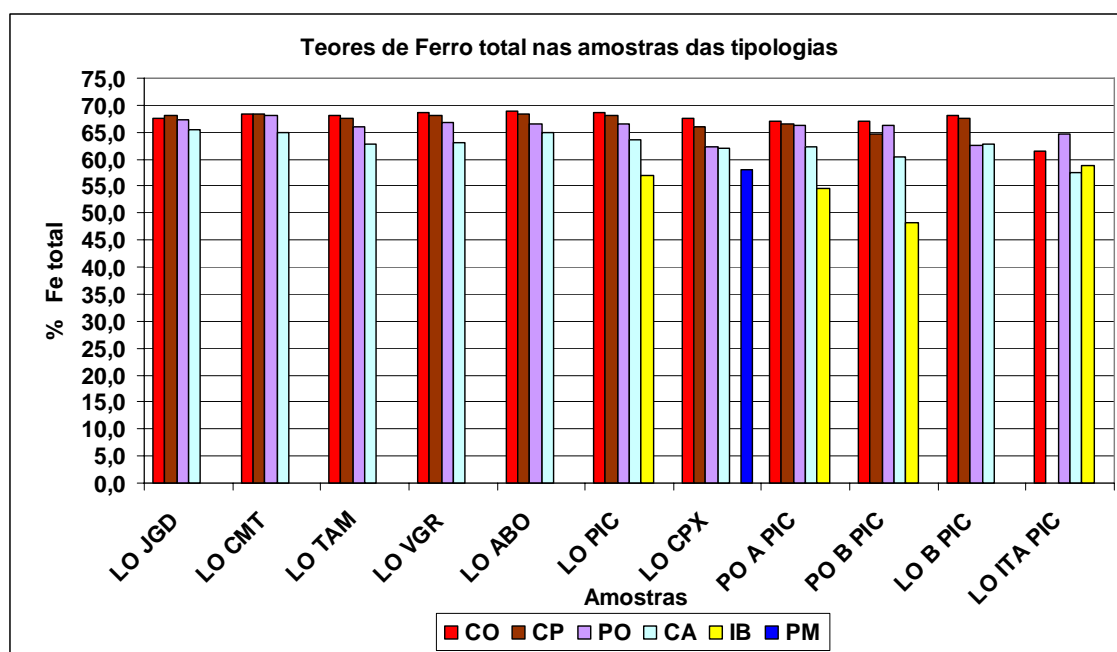


Figura 5.26 – Distribuição dos teores de ferro total ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) nas amostras tipológicas.

Os teores de FeO , representados na figura 5.27, são relativamente uniformes, exceto a tipologia compacta da amostra LOCPX, com provável presença de minerais associados à magnetita. Em termos gerais, os minérios das minas amostradas têm baixos teores de FeO , conseqüentemente, percentuais reduzidos do mineral magnetita.

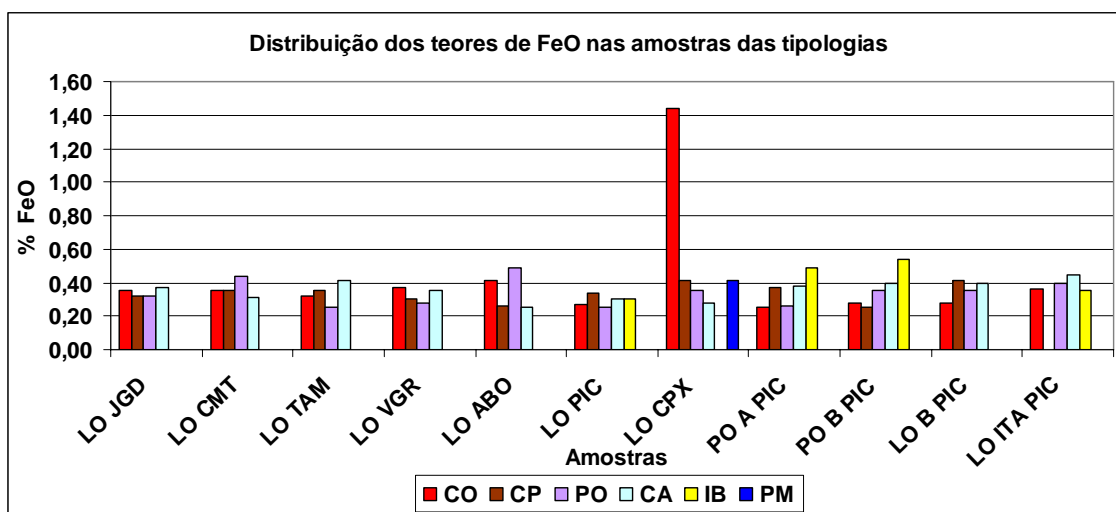


Figura 5.27 – Distribuição dos teores de FeO nas amostras tipológicas.

Os teores médios de sílica são baixos (< 1,50%), exceto nas tipologias itabiríticas (LOPIC, POAPIC, POBPIC e LOITAPIC). As tipologias porosas apresentam também baixos teores de sílica pela lixiviação intensa que o proto-minério foi submetido durante o enriquecimento e alteração supergênica (figura 5.28).

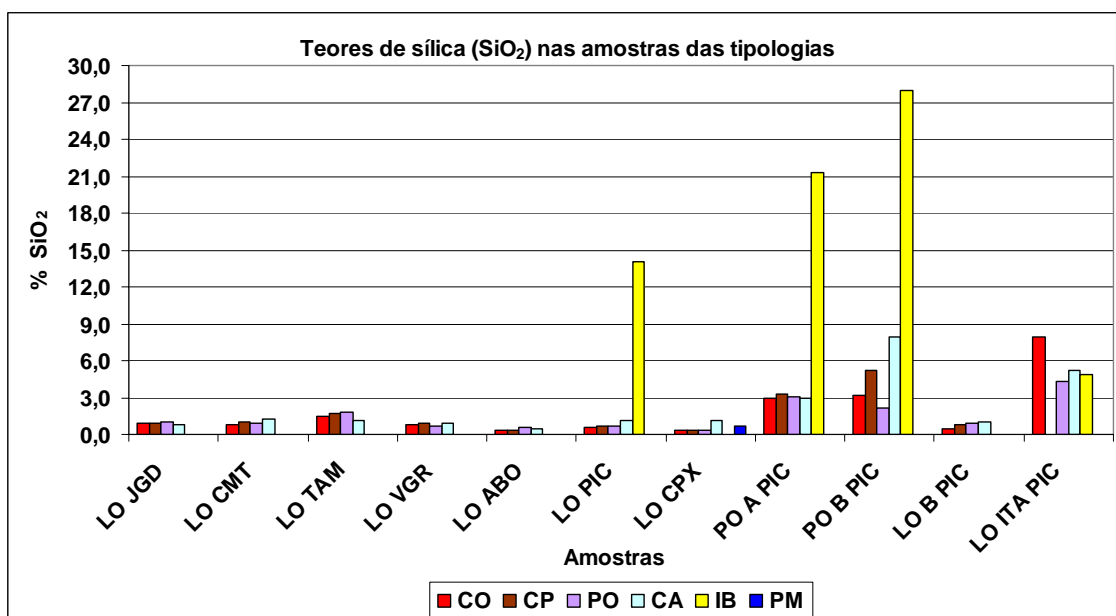


Figura 5.28 – Distribuição dos teores de sílica nas amostras tipológicas.

Nas amostras mais silicosas, a canga também apresenta teores de sílica mais altos, pois foi derivada a partir de itabiritos situados próximos à superfície atual, razão pela qual sofreram ação dos processos de intemperismo supergênico mais recente.

Os teores de alumina são mais elevados nas tipologias porosas, associadas à canga e itabiritos mais superficiais. Nas tipologias compactas e compactas porosas os teores de alumina são mais baixos, principalmente com relação às tipologias porosas, confirmando as diferenças genéticas na formação dos corpos geológicos. Na amostra LOCPX, as diferenças são muito acentuadas, com baixos valores nos litotipos compactos e compacto-porosos e teores muito elevados nos litotipos porosos, associados à canga e proto-minério. O produto LOCPX representa um minério diferenciado, com lixiviação parcial do proto-minério e associação carbonatada, gerando tipologias aluminosas bastante diferenciadas (figura 5.29).

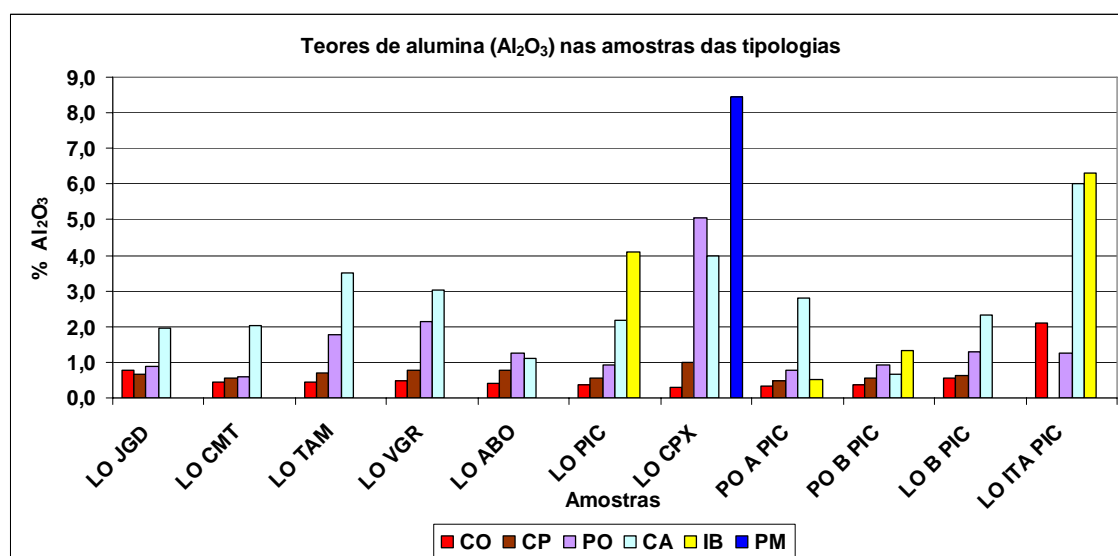


Figura 5.29 – Distribuição dos teores de alumina nas amostras tipológicas, enfatizando os altos teores nas tipologias porosas, associadas à canga, proto-minério e itabiritos alterados.

A figura 5.30 sumaria as perdas por calcinação (PPC) nas amostras das tipologias, ressaltando os valores mais levados nas tipologias porosas, associadas à canga e proto-minério. Os resultados mais elevados de perda ao fogo são ocasionadas por minerais hidratados, principalmente argilo-minerais, goethita e gibbsita. A amostra de

LOITAPIC é uma exceção, pois é composta por itabiritos superficiais muito alterados, tendo concentrado alto percentual de minerais hidratados. A distribuição dos teores é diretamente proporcional aos valores da variável alumina.

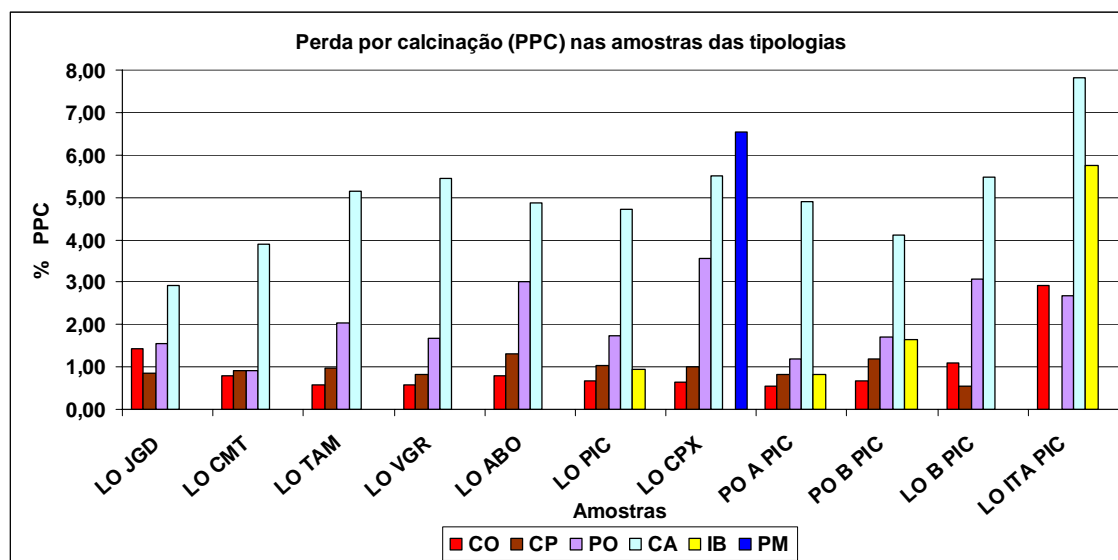


Figura 5.30 – Distribuição dos teores de perda por calcinação (PPC) nas amostras tipológicas, ressaltando a alta concentração nas tipologias porosas, à base de canga, proto-minério e itabiritos alterados.

Os teores de manganês são considerados anômalos nas amostras de LOCPX, onde o minério encontra-se associado a carbonatos, concentrado nas tipologias porosas, compactas porosas e proto-minério. Nos produtos LOPIC e LOBPIC, o manganês se concentra nas tipologias porosas. Na amostra de LOITAPIC, o teor mais elevado está na tipologia itabirítica. Nas tipologias compactas os teores são baixos, demonstrando que a gênese dos minérios hematíticos compactos é diferenciada, contrastando com a origem supergênica dos minérios de consistência média e macia, comumente associada a carbonatos manganésíferos (figura 5.31).

Os teores médios de cálcio e magnésio são baixos, exceto nas tipologias do LOCPX, que confirma a afinidade carbonática do minério (figuras 5.32 e 5.33). Em termos de alteração supergênica, a tendência desses elementos é serem lixiviados em solução, possibilitando o aumento do teor de ferro no minério de consistência média e macia. Na tipologia proto-minério, a lixiviação foi parcial.

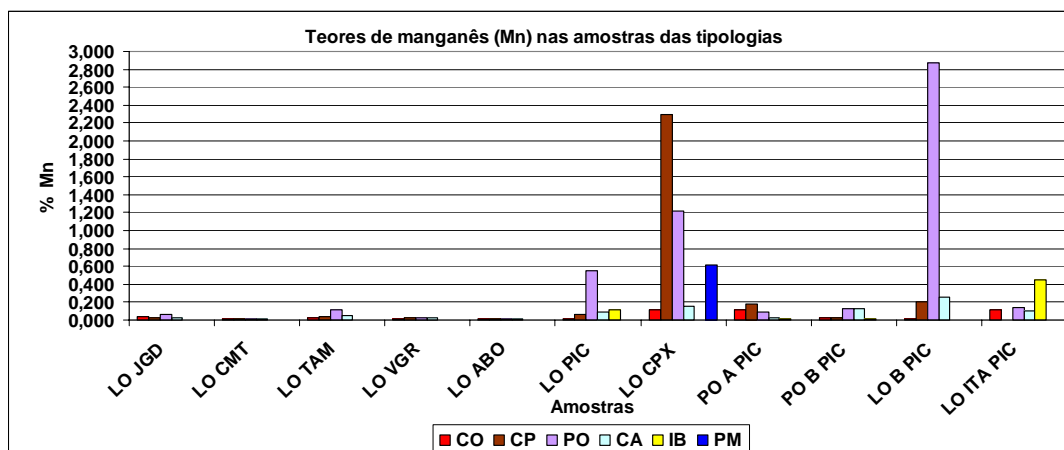


Figura 5.31 – Distribuição dos teores de manganês nas amostras tipológicas.

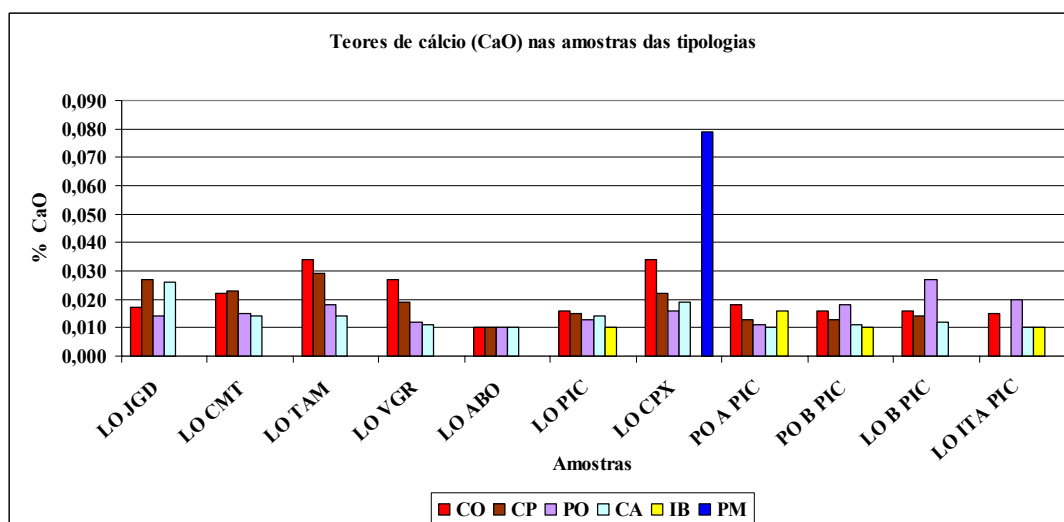


Figura 5.32 – Distribuição dos teores de cálcio nas amostras tipológicas.

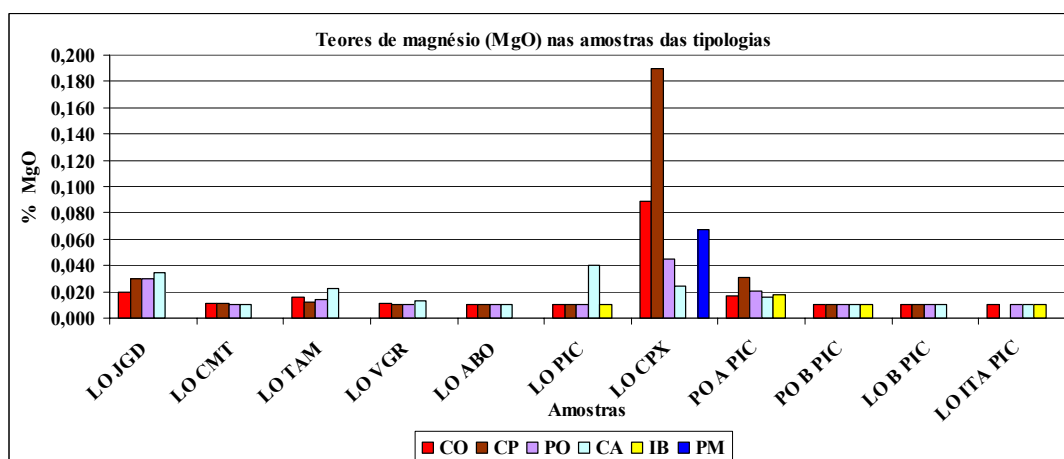


Figura 5.33 – Distribuição dos teores de magnésio nas amostras tipológicas.

Os teores de titânio são mais elevados nas tipologias derivadas de processos de alteração pronunciada, como as cangas e as tipologias porosas. Está associado a reações químicas de substituição no ambiente de alteração próximo à superfície. As amostras de LOABO, LOCPX e POAPIC, apresentam os teores mais altos, acompanhando as tipologias formadas no ambiente intempérico pronunciado (figura 5.34).

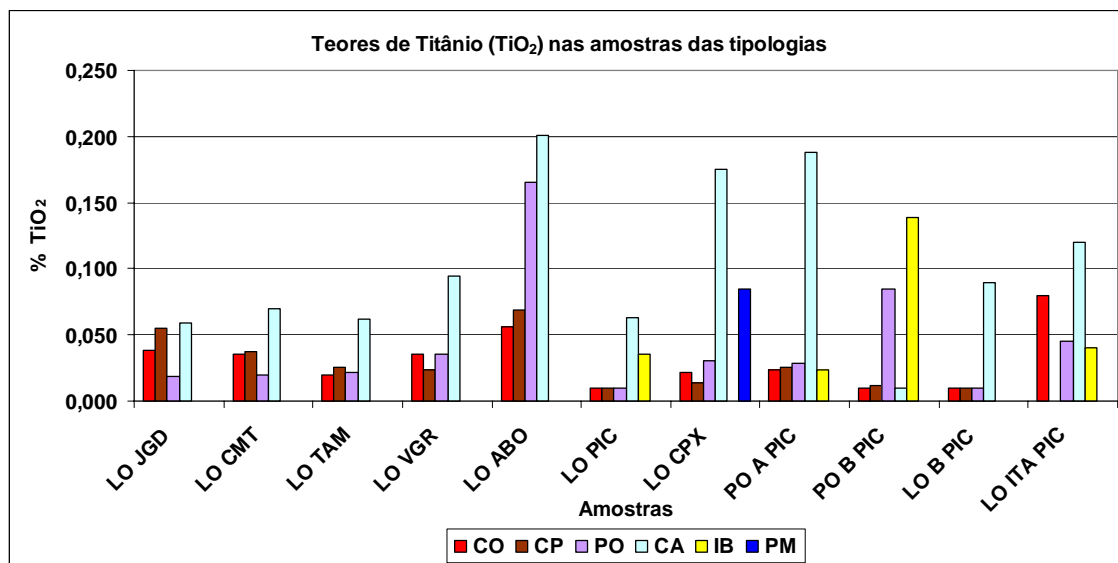


Figura 5.34 – Distribuição dos teores de titânio nas amostras tipológicas.

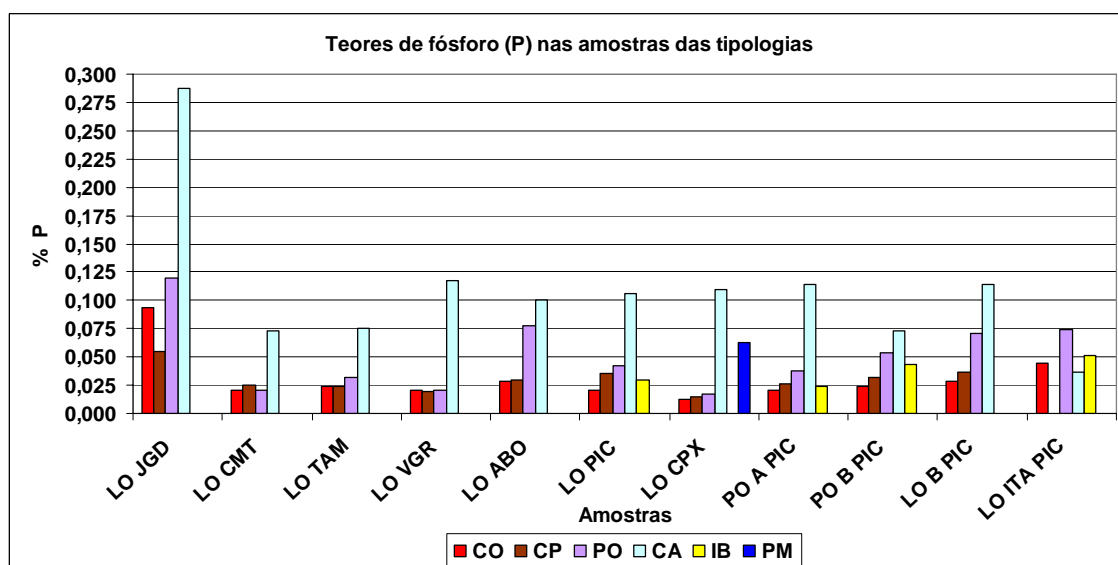


Figura 5.35 – Distribuição dos teores de fósforo nas amostras tipológicas.

Os teores de fósforo são mais elevados nas tipologias porosas e associados à canga, exceto na amostra LOJGD, onde o mineral wavellita (fórmula química: $Al_2(PO_4)_2(OH,F).5H_2O$), de origem primária hidrotermal, formada por processos de alteração supergênica, se apresenta como a principal característica da jazida. A tipologia denominada de proto-minério da amostra LOCPX, também é anômala em fósforo, possivelmente associada à rocha original carbonatada (figura 5.35).

5.4 – Caracterização metalúrgica dos produtos granulados

A tabela 5.4.1 sumaria os resultados dos testes metalúrgicos nas amostras de produtos granulados de minério de ferro, objetivando estabelecer comparações e correlações geológicas entre as amostras.

Tabela V.4 – Resumo dos resultados dos testes metalúrgicos nas amostras de produtos granulados.

Produto	Midrex Linder Test		LS (ppm)	Redutibilidade (% de Redução)	RDI (% < 2,80 mm)	Índice de Crepitação			Tamboramento	
	GM (%)	FG (< 3,35 mm)				(< 4,75 mm)	(< 6,30 mm)	TI (> 6,30 mm)	AI (< 0,50 mm)	
LO JGD	93,10	4,10	16,60	53,50	12,40	3,0 ± 1,3	4,0 ± 2,0	88,70	8,10	
LO CMT	95,70	5,50	7,70	47,30	14,70	3,4 ± 2,1	4,5 ± 2,9	78,50	12,10	
LO TAM	94,10	9,70	36,60	51,30	20,10	2,2 ± 1,5	3,0 ± 2,1	79,40	12,30	
LO VGR	95,60	6,80	29,30	49,80	9,40	3,6 ± 2,8	4,4 ± 3,4	81,90	11,50	
LO ABO	93,30	11,20	43,50	57,60	25,10	4,4 ± 1,7	5,1 ± 1,9	65,20	20,20	
LO PIC	92,20	13,50	28,60	55,10	20,10	3,7 ± 2,2	4,8 ± 2,8	75,70	15,30	
LO CPX	87,70	7,80	29,20	48,50	14,10	0,6 ± 0,5	0,8 ± 0,7	78,70	11,50	
PO A PIC	93,00	5,60	6,90	52,40	20,30	5,1 ± 2,6	6,6 ± 3,1	77,80	15,10	
PO B PIC	92,00	10,70	44,70	63,50	29,30	3,1 ± 2,5	3,9 ± 3,2	72,90	17,10	
LO B PIC	92,00	12,90	75,40	59,00	20,30	2,8 ± 1,6	3,8 ± 2,0	76,00	14,90	
LO ITA PIC	91,40	9,70	61,70	58,10	37,30	0,5 ± 0,2	0,6 ± 0,2	63,80	26,50	

GM: grau de metalização; **FG:** finos gerados; **LS:** liberação de enxofre; **RDI:** índice de degradação sob redução; **TI:** índice de tamboramento; **AI:** índice de abrasão.

O grau de metalização (GM) é inversamente proporcional ao percentual de compostos químicos contaminantes, principalmente as variáveis químicas sílica, alumina, perda por calcinação (PPC), manganês, fósforo, cálcio e magnésio. A linha de tendência está representando a redução do grau de metalização, devido ao aumento dos elementos contaminantes (figura 5.36). O grau de metalização da amostra de LOCPX representa

uma anomalia no conjunto, pelo alto percentual de alumina e perda por calcinação (PPC).

Os percentuais de finos gerados têm uma tendência inversa ao grau de metalização, demonstrada pela linha de tendência, sendo diretamente proporcional ao aumento dos compostos químicos contaminantes (ganga). Os finos gerados nas amostras LOCPX e POAPIC foram baixos, embora com quantidades significativas de ganga (figura 5.37).

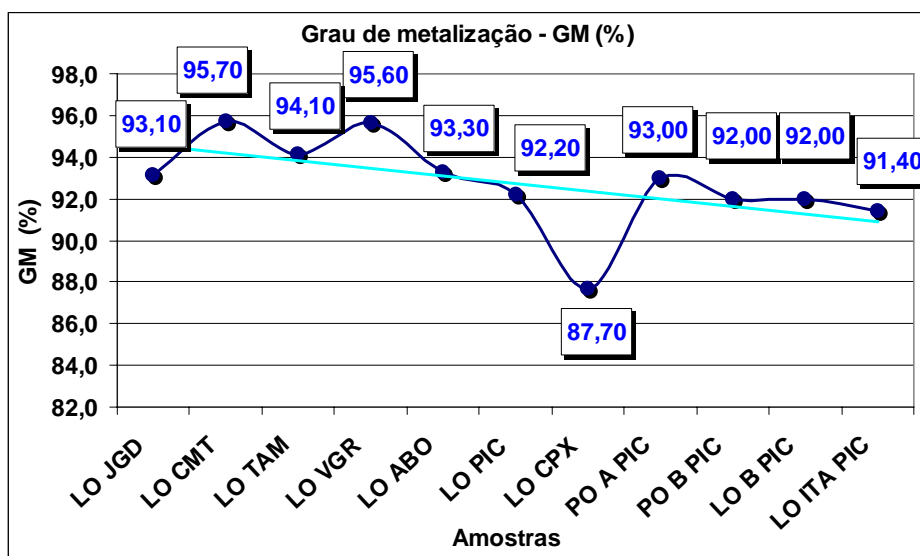


Figura 5.36 – Grau de metalização nas amostras de granulados (reta de tendência).

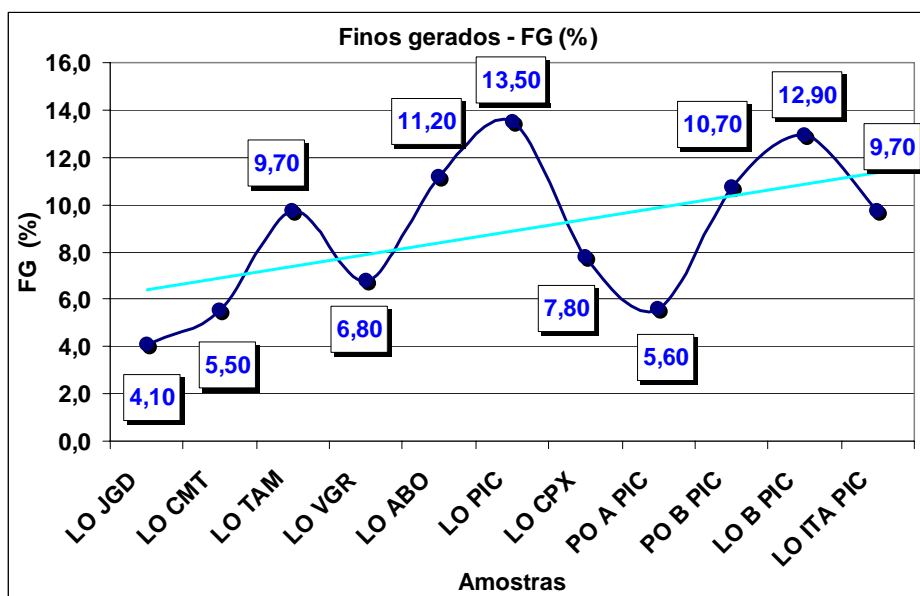


Figura 5.37 – Finos gerados nas amostras de granulados (reta de tendência).

Embora haja uma tendência de elevação em direção aos produtos com maior quantidade de ganga, os percentuais de finos gerados variam muito na curva, denotando uma variável metalúrgica de natureza complexa, com uma associação intrínseca à resistência mecânica das tipologias que compõem cada amostra.

A liberação de enxofre aumenta com os compostos contaminantes, principalmente os elementos associados à canga, como alumina, fósforo e perda por calcinação. O intemperismo tende a concentrar o elemento químico no minério. A linha de tendência acompanha o aumento da ganga nas amostras (figura 5.38). Pela alta variação dos valores, também pode ser considerada como uma variável de difícil mensuração, dependente das tipologias originadas pela supergênese e ação intempérica próxima à superfície.

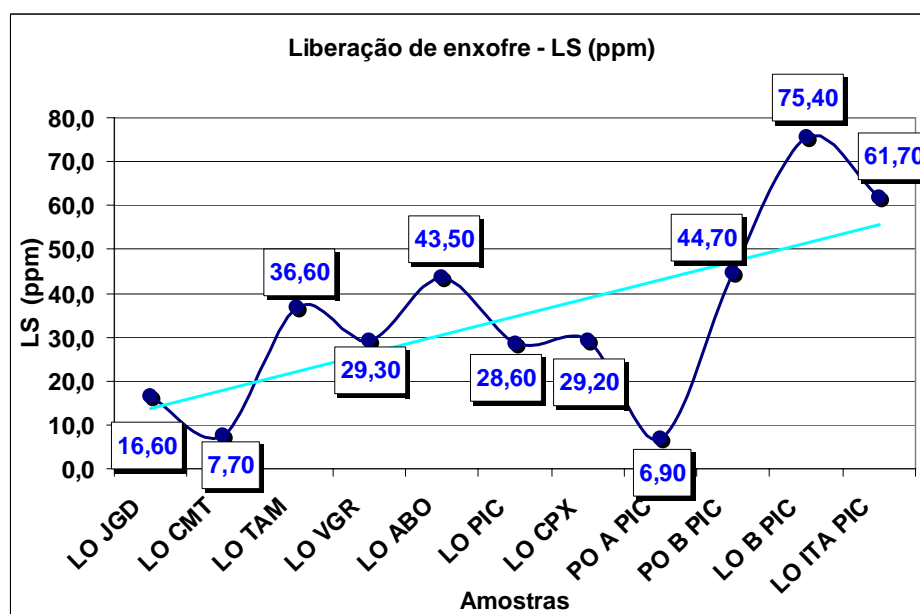


Figura 5.38 – Liberação de enxofre nas amostras de granulados.

Os índices de redutibilidade e RDI são diretamente proporcionais ao aumento de contaminações, principalmente sílica, alumina e perda por calcinação. Os minérios menos alterados, geralmente são menos porosos, pouco fraturados, gerando menor permeabilidade interna dos fragmentos, tendo como consequência menores índices de redutibilidade, pela menor velocidade de remoção de oxigênio do óxido de ferro e uma menor degradação sob redução, pela maior resistência mecânica dos fragmentos

compactos e compacto-porosos (figura 5.39). Nos minérios mais alterados e porosos, os índices de redutibilidade e RDI são mais elevados.

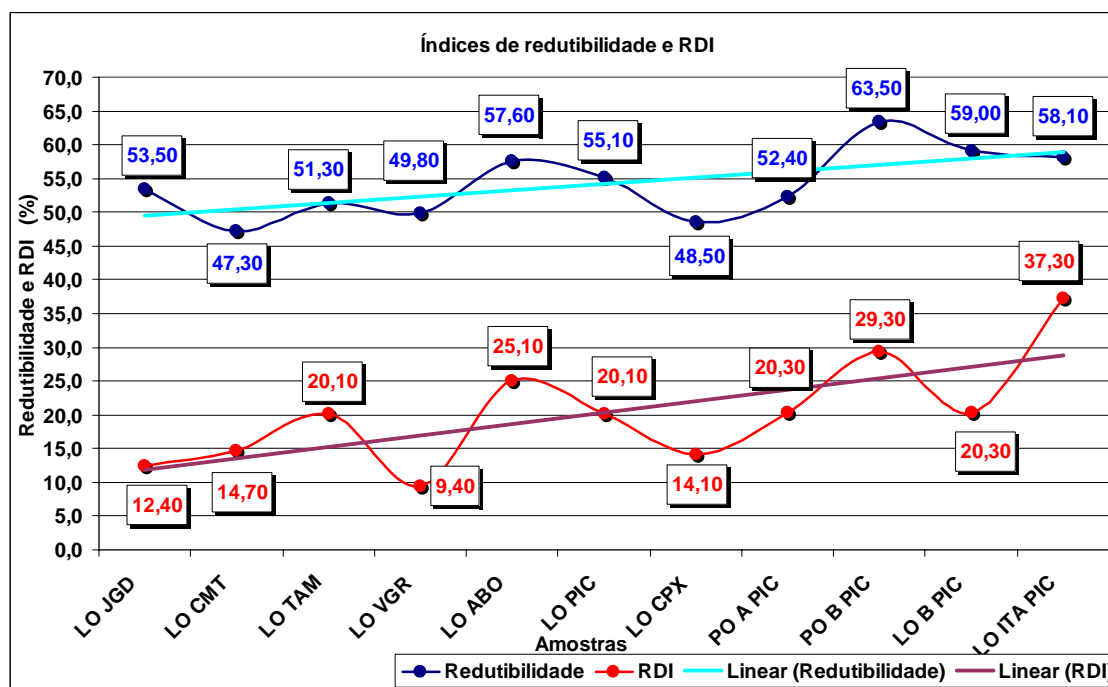


Figura 5.39 – Índices de redutibilidade e RDI nas amostras de granulados.

O gráfico da figura 5.40 sumaria os resultados dos ensaios de crepitação nas duas frações granulométricas (<4,75 mm e <6,30 mm). As duas retas de tendência mostram uma redução dos índices em direção aos minérios mais contaminados, principalmente por sílica, alumina e perda por calcinação (PPC), embora os resultados demonstrem uma alta variabilidade dos valores dos testes. As duas curvas estão muito próximas, sendo as diferenças nos índices das duas curvas creditados às granulometrias das amostras e demonstram a consistência e validação dos ensaios de laboratório.

A redução dos índices de crepitação em direção aos minérios com percentuais mais elevados de ganga, pode ser interpretada como uma relação direta com a resença de minerais mais hidratados, presença de goethita, fragmentos associados à canga e presença de minérios porosos, gerados por alteração supergênica, principalmente a partir de itabiritos dolomíticos e silicosos. Nos minérios menos alterados, portanto com menor porosidade e permeabilidade, a tendência é gerar maior quantidade de finos,

quando o minério é submetido a choque térmico. Nos produtos onde predominam as tipologias mais compactas e compacto-porosas, os índices de crepitações tendem a ser mais elevados.

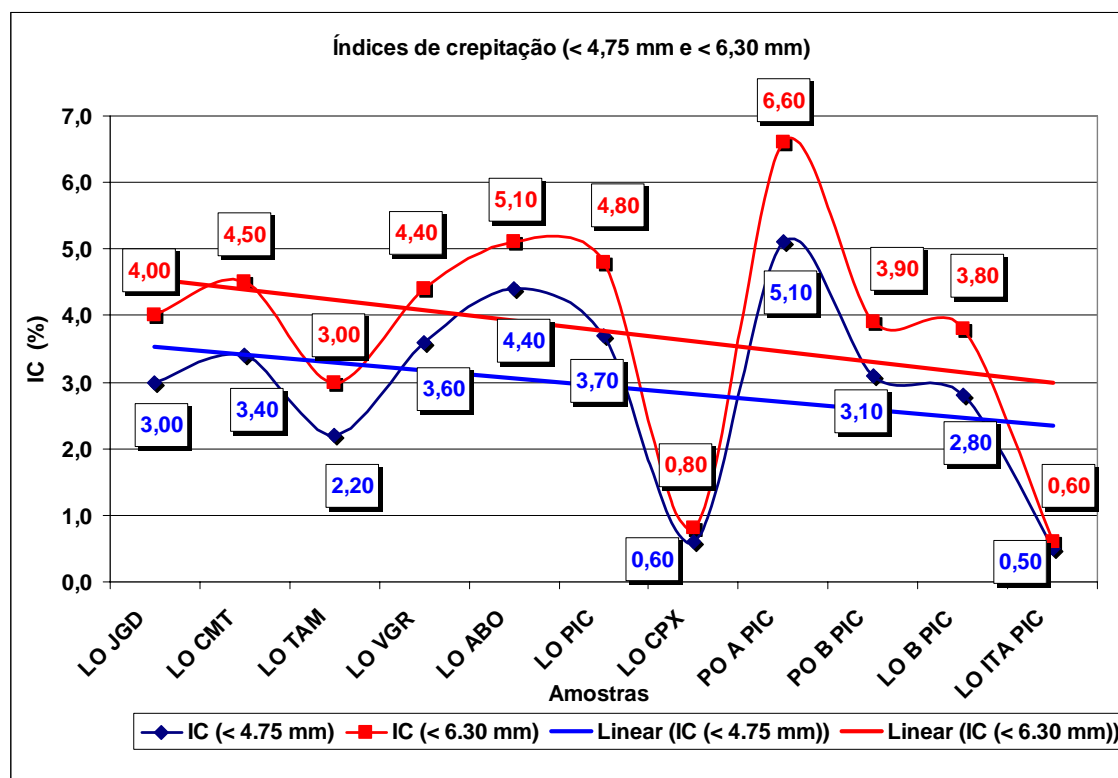


Figura 5.40 – Índices de crepitação nas frações <4,75 mm e <6,30 mm.

As amostras de LOCPX e LOITAPIC apresentam os índices de crepitações mais baixos, pelos altos valores de alumina e PPC no LOCPX e sílica, alumina e PPC no LOITAPIC.

A curva dos índices de tamboramento (TI) mostra a redução da resistência mecânica dos tipos de minérios, com o aumento dos percentuais de contaminantes (ganga). O aumento relativo das tipologias porosas, itabiríticas e associadas à canga, se constituem na causa fundamental de valores mais baixos dos índices de tamboramento. Os valores mais elevados estão diretamente relacionados com o predomínio de tipologias compactas e compacto-porosas, conferindo maior resistência ao produto no manuseio e transporte.

Os índices de abrasão (AI) consistem no percentual passante na peneira de 0,50 mm, após o ensaio padronizado. Os resultados estão refletindo uma relação inversa aos

índices de tamboramento. A geração de finos é maior nos minérios com menor resistência mecânica, portanto mais porosos e alterados por processos intempéricos. As linhas de tendência das duas curvas atestam a confiabilidade dos ensaios de laboratório, tendo como exemplo a amostra LOABO e LOITAPIC, que apresentaram os menores índices de tamboramento e os maiores valores de abrasão (figura 5.41).

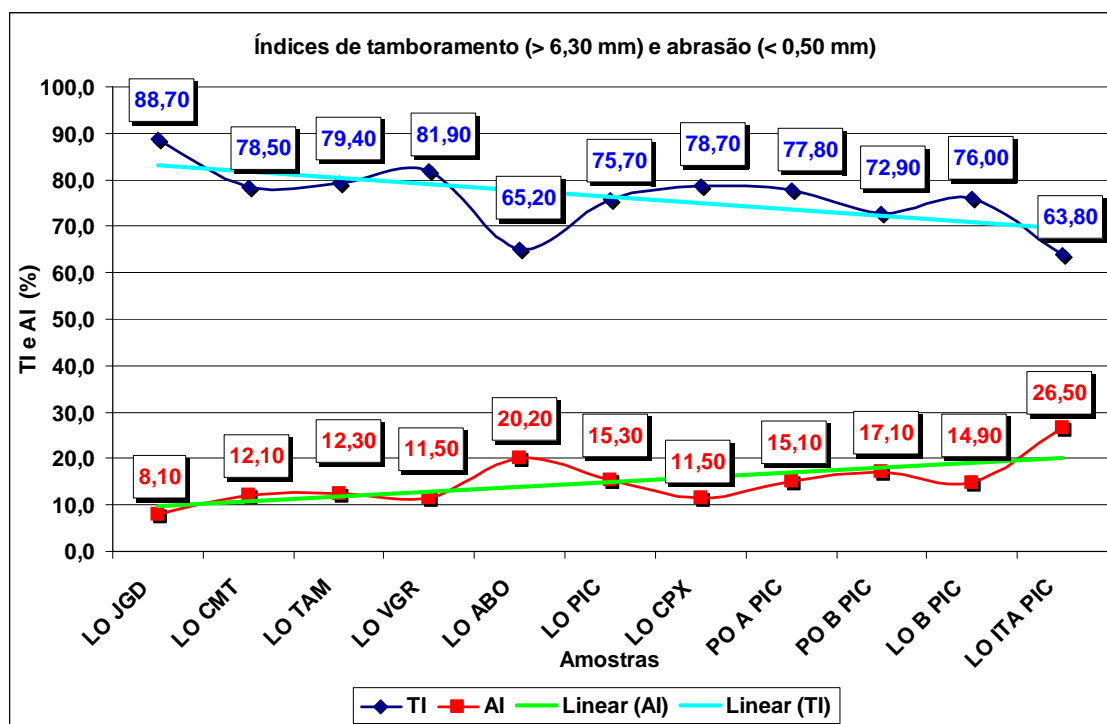


Figura 5.41 – Índices de tamboramento (TI) e abrasão (AI) nas amostras de produtos granulados.

Dando continuidade à caracterização metalúrgica, serão interpretados os gráficos de correlações entre os índices metalúrgicos, ampliando a interpretação e o significado geológico do comportamento dessas variáveis para a metalurgia do minério de ferro.

A correlação entre o grau de metalização e finos gerados é negativa (valor de -0,2713). O grau de metalização mais elevado é compatível com teores mais elevados de ferro total, incompatível com minérios com altos teores de ganga, situados à direita do gráfico (figura 5.42). As amostras onde predominam altos percentuais de tipologias compactas e compacto-porosas têm altos teores de ferro e maior resistência mecânica, gerando

menor percentual de finos. Os dois testes são importantes para a qualificação dos granulados para redução direta.

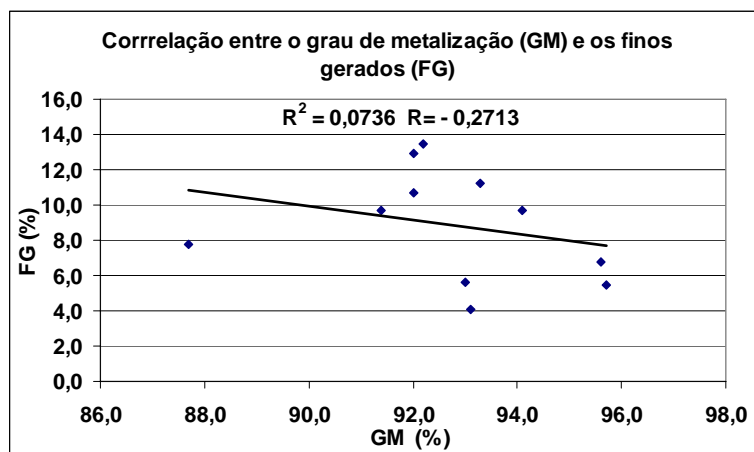


Figura 5.42 – Linha de tendência entre grau de metalização e finos gerados, com baixo valor de correlação.

A correlação do grau de metalização com a liberação de enxofre também é negativa (valor de -0,3111). Semelhante à correlação anterior, quanto mais contaminado o minério (valores mais elevados de alumina e PPC, principalmente), menor o grau de metalização, pois os teores de ferro total são mais baixos e a liberação de enxofre é maior, associada à canga, argilas e tipologias porosas (figura 5.43).

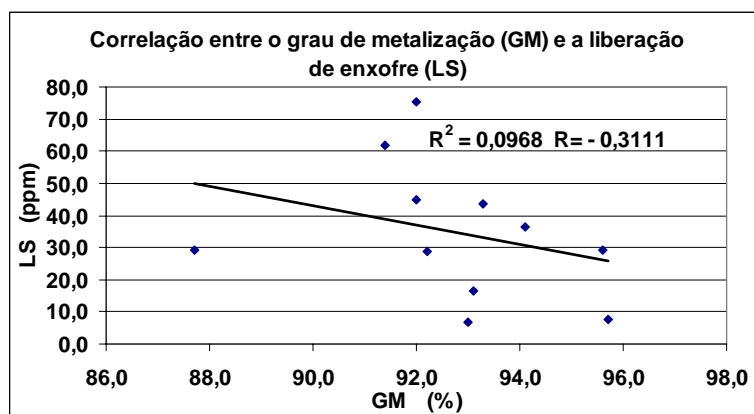


Figura 5.43 – Correlação entre o grau de metalização e liberação de enxofre.

A correlação entre o grau de metalização e redutibilidade é negativa (valor de -0,2124). Minérios com teores mais elevados de ferro total, são menos redutíveis, pela menor

porosidade e permeabilidade, removendo o oxigênio do óxido de ferro com maior dificuldade (figura 5.44).

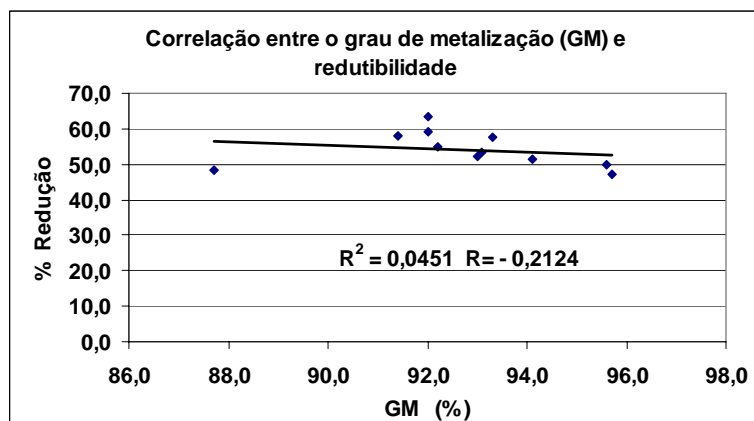


Figura 5.44 – Correlação entre o grau de metalização e redutibilidade.

Semelhante à redutibilidade, a correlação entre o grau de metalização e RDI é negativa (valor de $-0,2634$). Os minérios pouco alterados, com altos teores de ferro, degradam menos, gerando menor quantidade de finos durante a redução (figura 5.45). Os minérios mais alterados, com percentuais mais elevados de ganga, têm teores menores de ferro, mas apresentam uma degradação maior durante a redução.

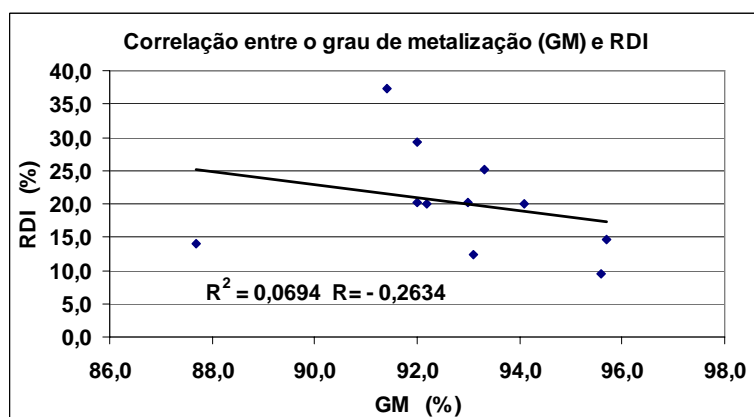


Figura 5.45 – Correlação entre o grau de metalização e RDI.

O grau de metalização tem forte correlação positiva com os índices de crepitação (<4,75 mm: 0,5901; <630 mm: 0,5946). Minérios pouco alterados, com teores mais altos de ferro têm altos índices de crepitação, causados pela baixa porosidade e permeabilidade,

que dificultam a saída dos vapores de água gerados (Figuras 5.46 e 5.47). Minérios mais alterados, com minerais hidratados, têm teores mais baixos de ferro, mas são mais porosos e permeáveis, portanto, com índices de crepitação mais baixos.

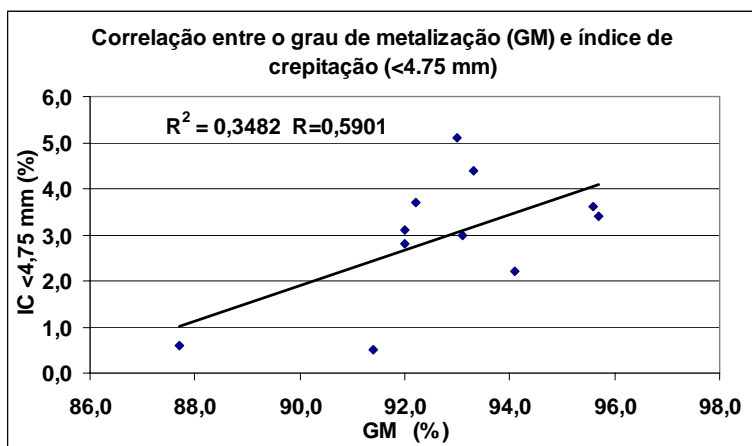


Figura 5.46 – Correlação entre o grau de metalização e índice de crepitação (fração <4,75 mm).

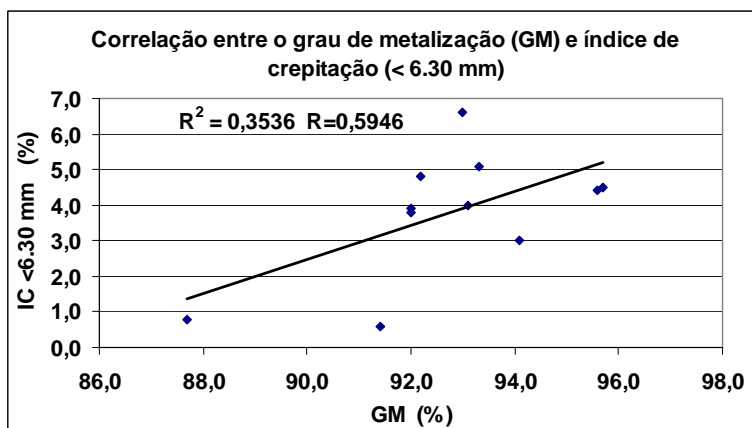


Figura 5.47 – Correlação entre o grau de metalização e índice de crepitação (fração <6,30 mm).

A correlação do grau de metalização com índice de tamboramento é fracamente positiva (valor de 0,2140). A resistência mecânica está relacionada a teores mais altos de ferro, conseqüentemente, a um grau de metalização maior (figura 5.48). Os minérios mais alterados e porosos têm menor resistência mecânica, teores menores de ferro e graus menores de metalização.

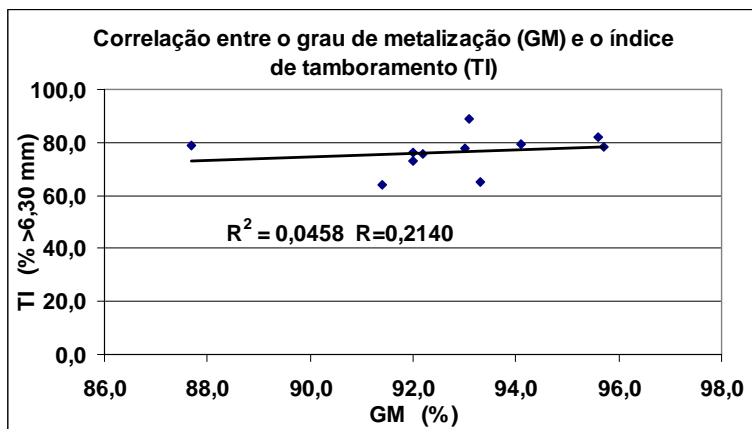


Figura 5.48 – Correlação entre o grau de metalização e índice de tamboramento.

A correlação entre o grau de metalização e os índices de abrasão é fracamente negativa (valor de -0,1934). A interpretação mais adequada está relacionada também à resistência mecânica, onde as amostras com teores mais altos de ferro correspondem a minérios mais resistentes, com menor geração de finos. Minérios com teores mais baixos de ferro, geram mais finos, medido no índice de abrasão (figura 5.49).

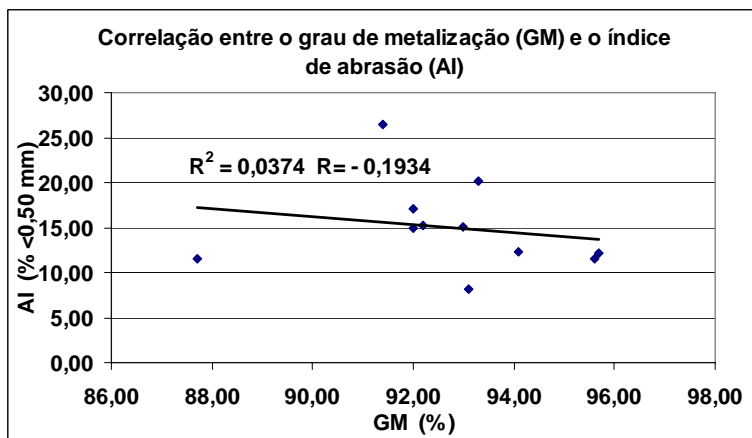


Figura 5.49 – Correlação entre o grau de metalização e índice de abrasão.

A correlação entre os finos gerados e liberação de enxofre é fortemente positiva (valor de 0,7290). Os maiores percentuais de finos gerados estão correlacionados aos minérios mais alterados, compostos por minerais argilosos e canga, onde os teores de enxofre são mais elevados (figura 5.50). Esses dois testes são aplicados para avaliar os produtos destinados para redução direta, além do grau de metalização.

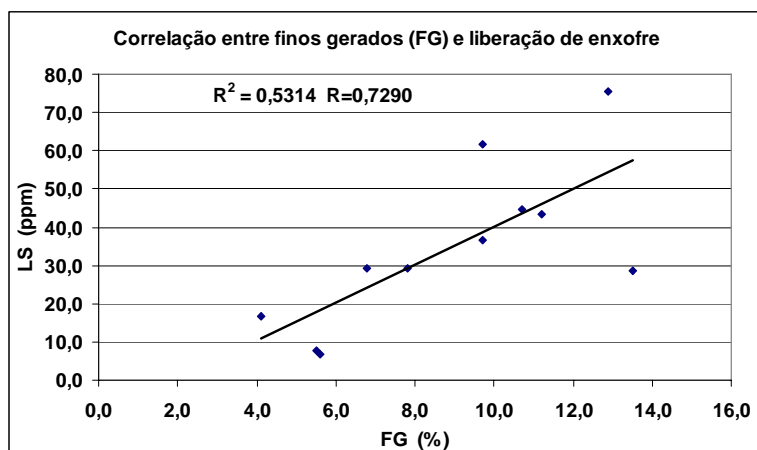


Figura 5.50 – Correlação entre finos gerados e liberação de enxofre.

O fator de correlação entre os finos gerados e a redutibilidade é fortemente positivo (valor de 0,6209). Minérios menos alterados geram menos finos e dificultam a remoção do oxigênio dos óxidos de ferro, significando índices menores de redutibilidade. Os processos de alteração geram tipologias porosas e permeáveis, com índices de redutibilidade mais elevados e com maior quantidade de finos (figura 5.51).

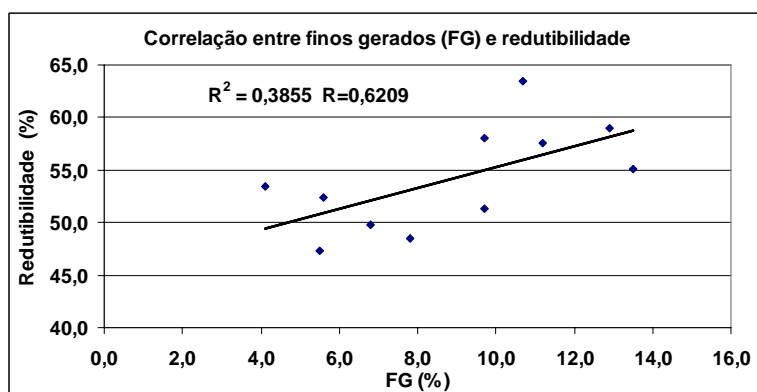


Figura 5.51 – Correlação entre finos gerados e redutibilidade.

Os finos gerados e RDI também têm uma correlação positiva (valor de 0,5030). Minérios com menor geração de finos, degradam menos durante a redução, enquanto minérios mais alterados porosos geram mais finos e a degradação é maior durante a redução. A resistência mecânica é importante nas duas variáveis (figura 5.52).

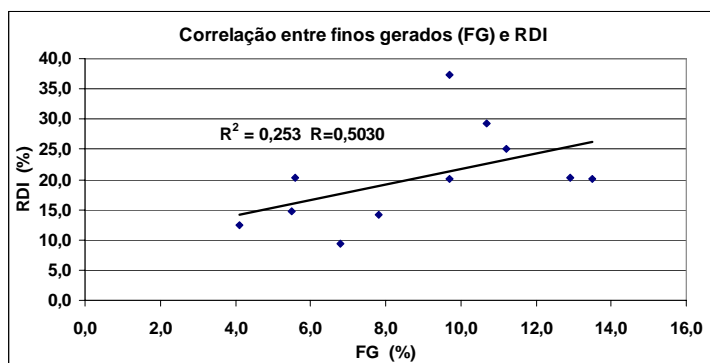


Figura 5.52 – Correlação entre finos gerados e RDI.

As correlações entre os finos gerados e os índices de crepitação são muito baixas (frações <4,75 mm: -0,0849 e <6,30 mm: -0,1082), considerando que a crepitação é uma variável metalúrgica complexa, dependente do grau de hidratação dos minerais e das tipologias porosas presentes nas amostras (figuras 5.53 e 5.54).

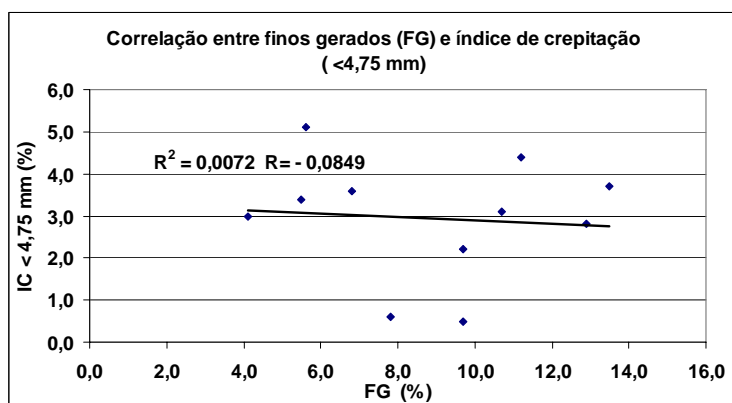


Figura 5.53 – Correlação entre finos gerados e índice de crepitação (<4,75 mm).

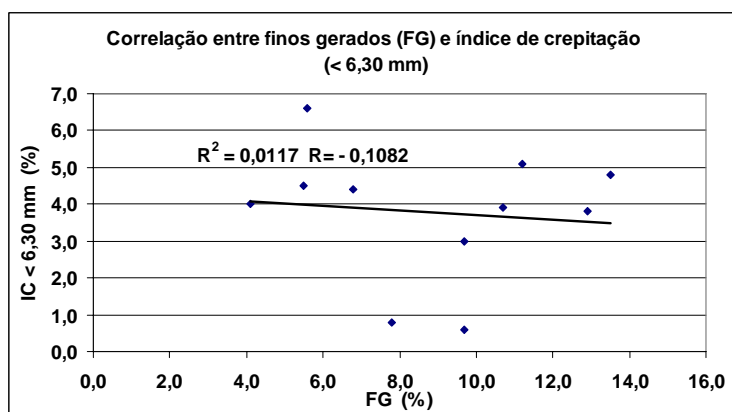


Figura 5.54 - Correlação entre finos gerados e índice de crepitação (<6,30 mm).

A correlação entre os finos gerados e índices de tamboramento é fortemente negativa (valor de $-0,5854$). As variáveis inversamente proporcionais dependem da resistência mecânica das amostras. Quanto maior a quantidade de finos gerados, menores os índices de tamboramento, associados aos minérios mais frágeis, geralmente mais alterados (figura 5.55).

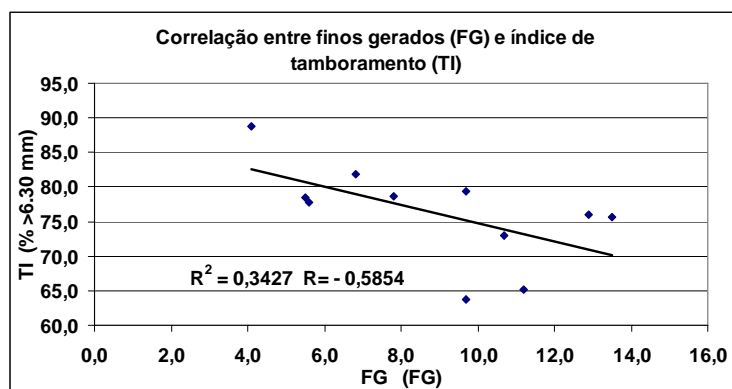


Figura 5.55 – Correlação entre finos gerados e índice de tamboramento.

A correlação entre finos gerados e os índices de abrasão é positiva (valor de $0,4940$), contrária à correlação com os índices de tamboramento. As duas variáveis avaliam os finos gerados, apenas em granulometrias diferentes e são dependentes da resistência mecânica das tipologias das amostras (figura 5.56).

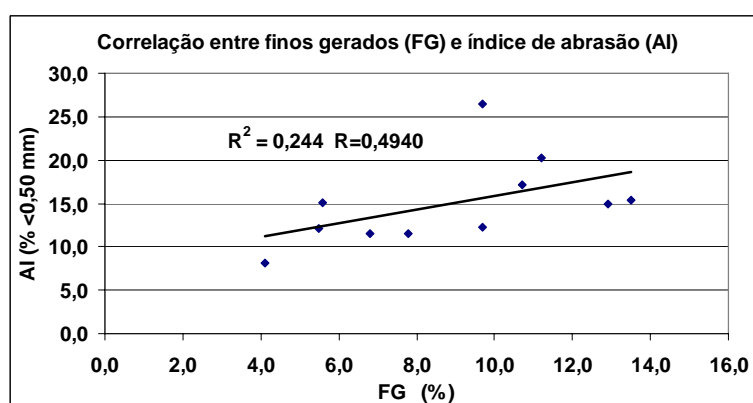


Figura 5.56 – Correlação entre finos gerados e índices de abrasão.

A correlação entre a liberação de enxofre e a redutibilidade é fortemente positiva (valor de $0,6780$). O enxofre concentra nos minérios mais alterados, com tipologias porosas e

canga. Os minérios com índices mais altos de redutibilidade estão relacionados a minérios submetidos a processos de alteração mais pronunciados, fazendo com que as duas variáveis metalúrgicas são diretamente proporcionais (figura 5.57).

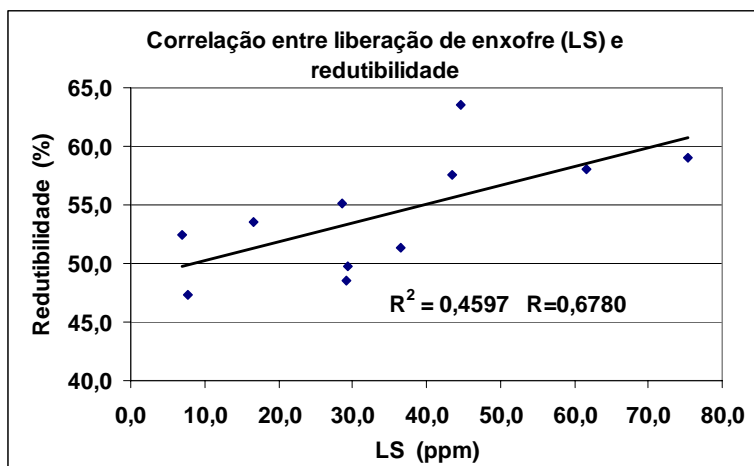


Figura 5.57 – Correlação entre a liberação de enxofre (ppm) e redutibilidade.

A correlação entre a liberação de enxofre e RDI é positiva (valor de 0,5757). Minérios menos alterados têm menor liberação de enxofre e menor degradação durante a redução. Minérios mais alterados têm maior liberação de enxofre e degradação maior durante a redução (figura 5.58).

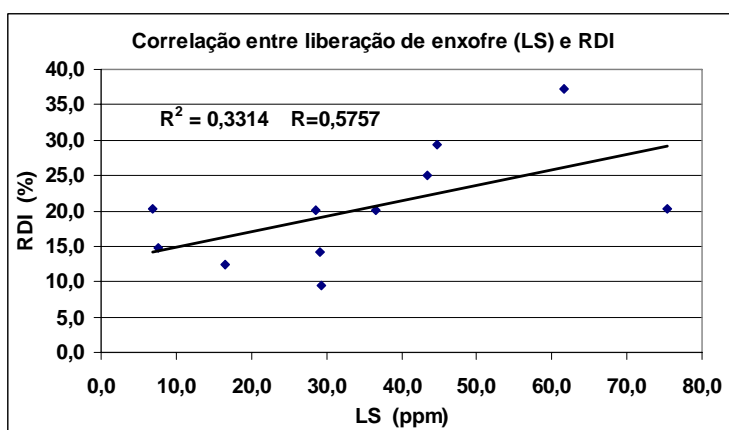


Figura 5.58 – Correlação entre liberação de enxofre e RDI.

As correlações entre liberação de enxofre e índices de crepitação são negativas (frações <4,75 mm: -0,4246 e <6,30 mm: -0,4499). Os minérios menos alterados, com baixa

liberação de enxofre, têm valores mais elevados de crepitação, por ser menos porosos e com menor permeabilidade. Com o aumento do nível de alteração, aumenta a porosidade e o percentual de minerais hidratados, sendo que o vapor de água gerado não encontra resistência na saída, com conseqüente redução do índice de crepitação (figuras 5.59 e 5.60).

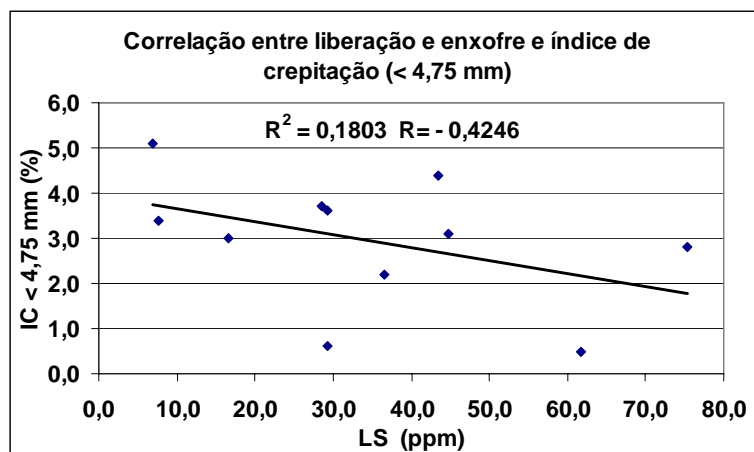


Figura 5.59 – Correlação entre liberação de enxofre e crepitação (fração <4,75 mm).

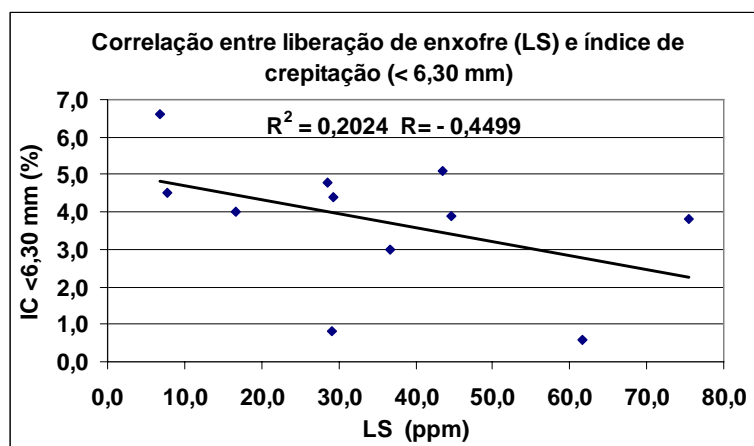


Figura 5.60 - Correlação entre liberação de enxofre e crepitação (fração <6,30 mm).

A correlação entre liberação de enxofre e tamboramento é negativa (valor de -0,5616). Quanto maior a liberação de enxofre, maior a alteração dos minérios e a resistência mecânica são menores, equivalendo a índices mais baixos de tamboramento (figura 5.61). Minérios menos alterados têm baixa liberação de enxofre e índices de tamboramento mais elevados.

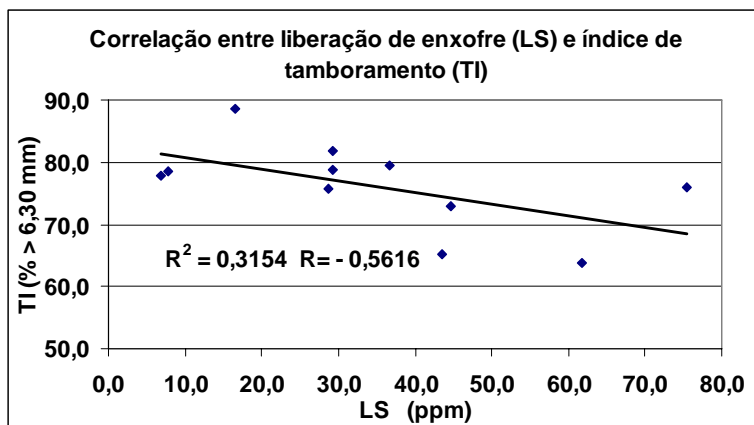


Figura 5.61 – Correlação entre liberação de enxofre e índice de tamboramento.

A correlação entre liberação de enxofre e índice de abrasão é positiva (valor de 0,5688), contrária à do tamboramento, estando fortemente relacionada ao nível de alteração dos minérios. Os mais alterados tem altos valores de liberação de enxofre e índices de abrasão mais elevados (figura 5.62).

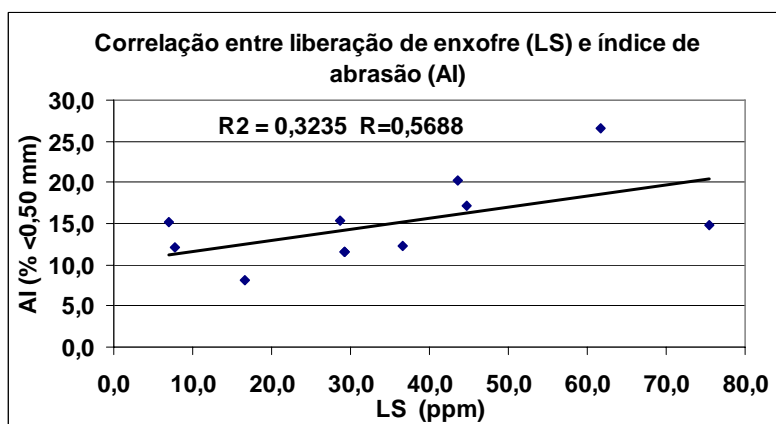


Figura 5.62 – Correlação entre liberação de enxofre e índice de abrasão.

A correlação entre redutibilidade e RDI é fortemente positiva (valor de 0,7350), influenciada pela alteração maior dos minérios, reduzindo o percentual de tipologias compactas e aumentando itabiritos e canga. Com essas características aumenta a velocidade de remoção do oxigênio dos óxidos de ferro e a degradação durante o processo de redução é maior (figura 5.63). O aumento da permeabilidade interna dos fragmentos, através dos processos de alteração supergência e superficial, foram extremamente importantes para esta associação positiva.

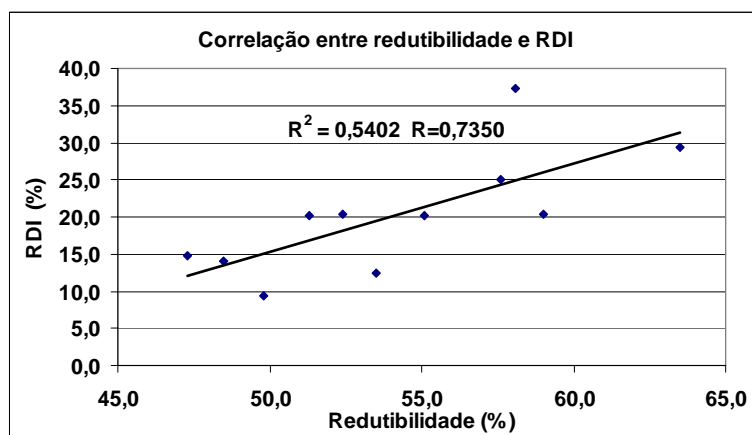


Figura 5.63 – Correlação entre redutibilidade e RDI.

As correlações entre redutibilidade e índices de crepitação são positivas, mas com valores muito baixos (fração <4,75 mm: 0,0346; fração <6,30 mm: 0,0224). Como a crepitação é uma variável metalúrgica mais complexa, dependente dos minerais hidratados, presença de goethita e porosidade dos fragmentos, os resultados das amostras objeto do estudo não refletem correlações significativas, apenas indicando variáveis com resultados levemente diretamente proporcionais (figuras 5.64 e 5.65). Minérios mais hidratados tendem a valores mais altos de redutibilidade e crepitação.

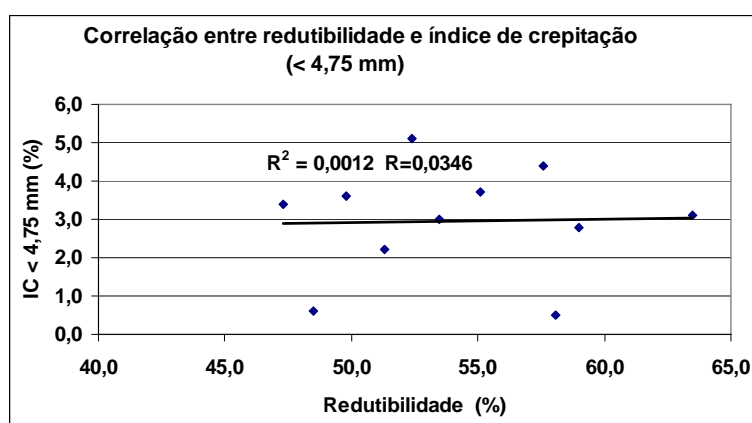


Figura 5.64 – Linha de tendência entre redutibilidade e crepitação (fração <4,75 mm), com correlação muito baixa.

A correlação entre redutibilidade e tamboramento é negativa (valor de -0,5505), demonstrando que os minérios menos alterados têm menores índices de redutibilidade e maiores índices de tamboramento, portanto, menor resistência mecânica. Os minérios

mais alterados apresentam índices de redutibilidades mais elevados, pela maior facilidade de remoção do oxigênio, mas por outro lado, apresentam menores resistências mecânicas, com índices de tamboramento mais baixos (figura 5.66).

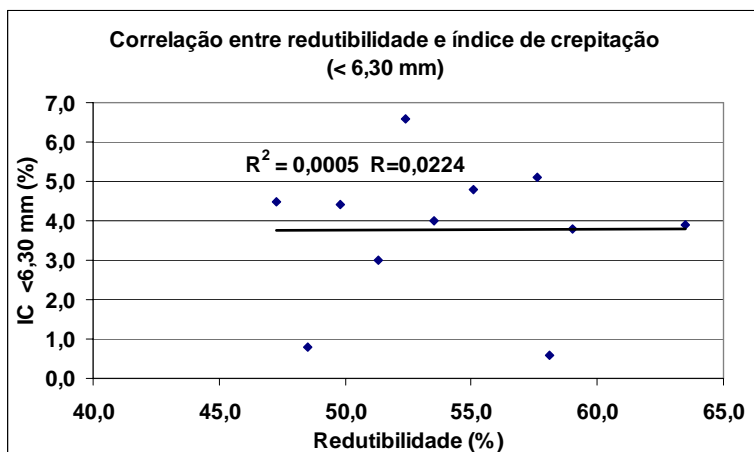


Figura 5.65 – Correlação entre redutibilidade e crepitação (fração <6,30 mm).

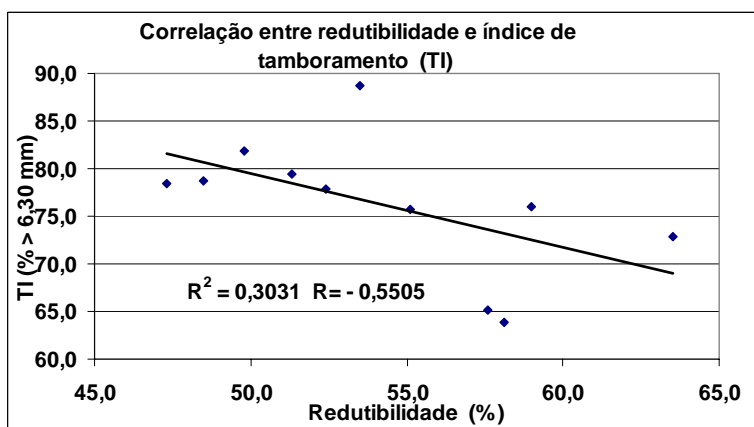


Figura 5.66 – Correlação entre redutibilidade e tamboramento.

Com relação à correlação entre redutibilidade e índices de abrasão o valor é positivo (0,5984), inverso à correlação com o tamboramento, pois o percentual de finos é diretamente proporcional aos minérios mais alterados, portanto mais facilmente redutíveis. A porosidade e permeabilidade são mais elevadas (figura 5.67).

A correlação entre RDI e os índices de crepitações são negativos, embora os resultados não sejam elevados (fração <4,75 mm: -0,2532; fração <6,30 mm: -0,2869). A

interpretação mais adequada está associada aos níveis de alteração dos minérios. Quanto menos alterados os minérios, os índices de RDI são menores e os índices de crepitação são mais elevados, pela baixa porosidade. Minérios mais alterados são mais porosos e a saída do vapor de água é facilitada, com baixos valores de crepitação. Por outro lado, a degradação durante a redução é mais elevada (figuras 5.68 e 5.69).

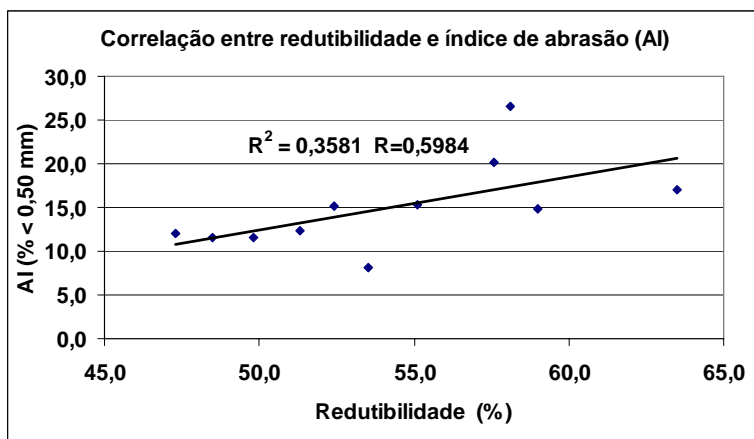


Figura 5.67 – Correlação entre redutibilidade e abrasão.

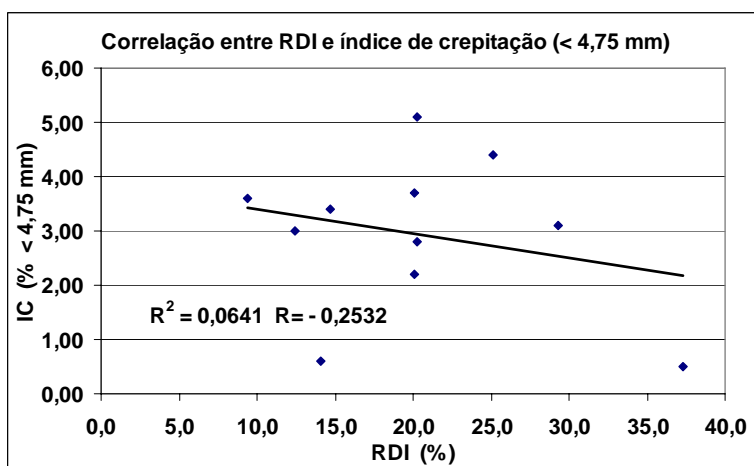


Figura 5.68 – Correlação entre RDI e crepitação (fração <4,75 mm).

A correlação entre RDI e tamboramento é fortemente negativa (valor de -0,8521). Os minérios menos alterados têm índices de RDI mais baixos, com degradação mais baixas quando submetidos à redução e apresentam maiores índices de tamboramento, pois a resistência mecânica é mais elevada. Nos minérios mais alterados a degradação sob

redução é maior e os índices de tamboramento são menores, pela menor resistência das tipologias envolvidas (figura 5.70).

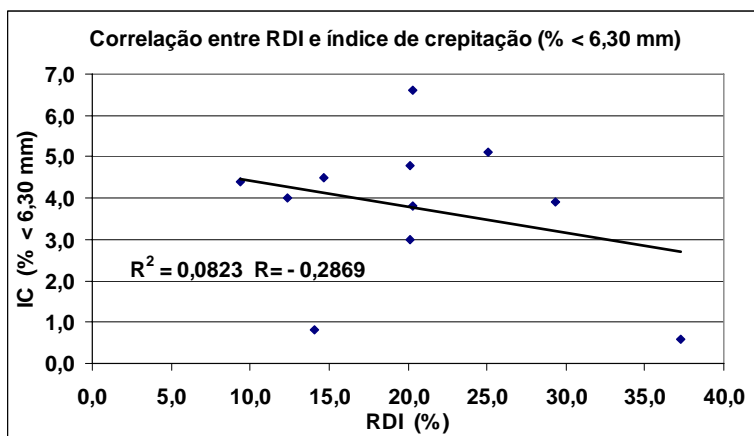


Figura 5.69 – Correlação entre RDI e crepitação (fração <6,30 mm).

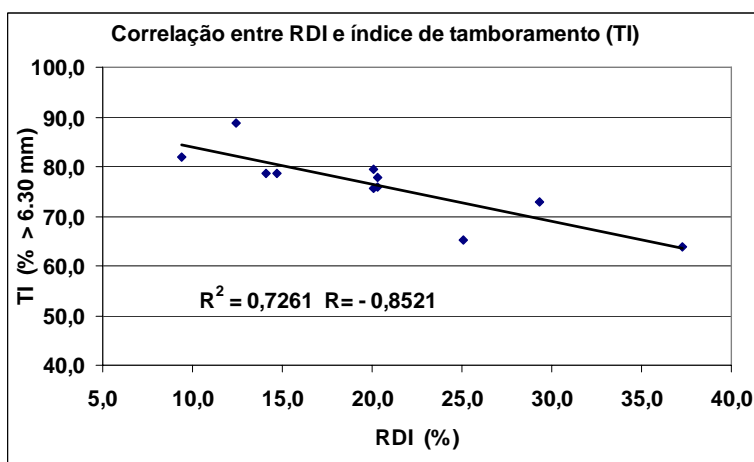


Figura 5.70 – Correlação entre RDI e tamboramento.

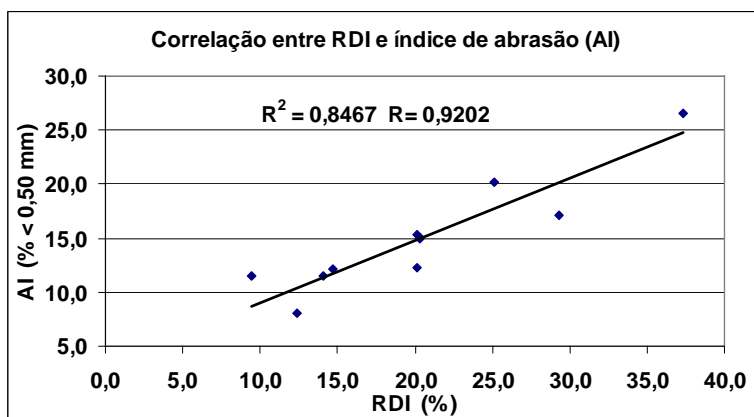


Figura 5.71 – Correlação entre RDI e abrasão.

A correlação entre RDI e os índices de abrasão é fortemente positiva (valor de 0,9202), contrária à correlação RDI e tamboramento. Minérios mais alterados geram mais finos sob redução e pela menor resistência, os índices de abrasão são maiores. Por outro lado, minérios menos alterados geram menos finos quando submetidos à redução, sendo mais resistentes (figura 5.71).

A forte correlação positiva entre os dois índices de crepitação (valor de 0,9929) atesta a confiabilidade dos ensaios metalúrgicos, embora os testes tenham sido feitos com faixas granulométricas diferentes (figura 5.72). Em termos gerais a média dos índices de crepitação dos minérios mais silicosos é mais baixa, pela facilidade com que os vapores de água gerados se movem, encontrando fraca resistência na saída dos fragmentos de granulados.

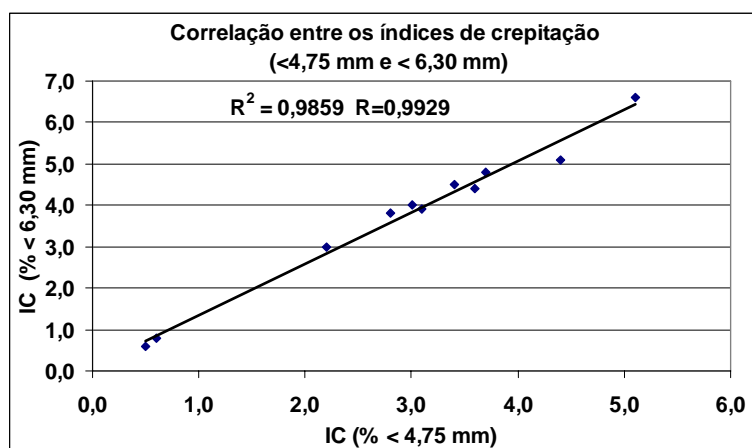


Figura 5.72 – Correlação entre os índices de crepitação.

Os índices de crepitação (<4,75 mm) e tamboramento têm baixa correlação positiva (valor de 0,1411). Os índices mais elevados de tamboramento estão associados a minérios mais resistentes, menos porosos e que dificultam a saída do vapor de água. Minérios com menor resistência (baixo TI) são mais porosos, facilitando a saída de água, portanto apresentam índices de crepitação mais baixos (figura 5.73).

Os índices de crepitação (<4,75 mm) e abrasão tem baixa correlação negativa (valor de 0,1908), pois os minérios mais frágeis geram mais finos (valores mais elevados de AI),

mas os índices de crepitação são mais baixos, pela porosidade e permeabilidade mais elevadas (figura 5.74).

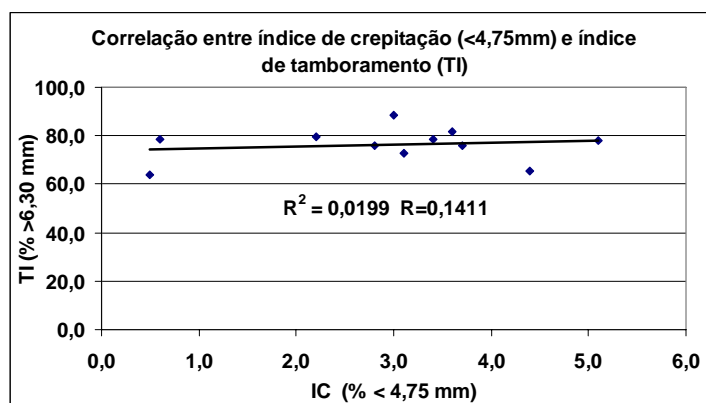


Figura 5.73 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e tamboramento.

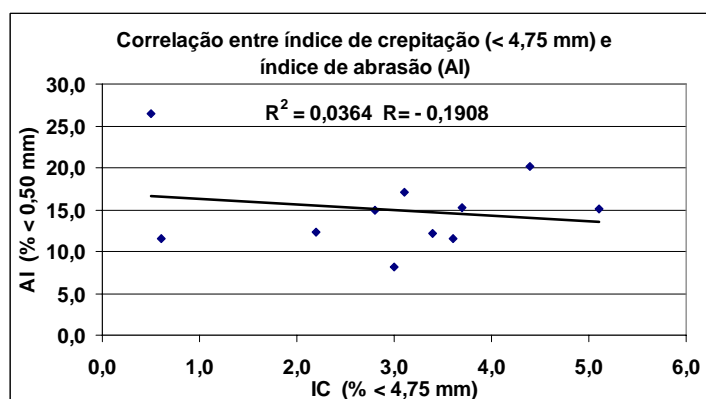


Figura 5.74 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e abrasão.

As correlações dos índices de crepitação (fração <6,30 mm) e tamboramento apresentaram resultados semelhantes aos testes de crepitação com a fração <4,75 mm, sendo positiva com o tamboramento (valor de 0,2121) e negativa com os índices de abrasão (valor de -0,2492). As figuras 5.75 e 5.76 sumarizam os resultados.

A correlação entre índice de tamboramento e abrasão é fortemente negativa (valor de 0,9509). As variáveis são inversamente proporcionais, pois minérios mais resistentes apresentam índices de tamboramento elevados e índices de abrasão baixos. Minérios mais frágeis têm baixos índices de tamboramento e índices de abrasão elevados (figura 5.77).

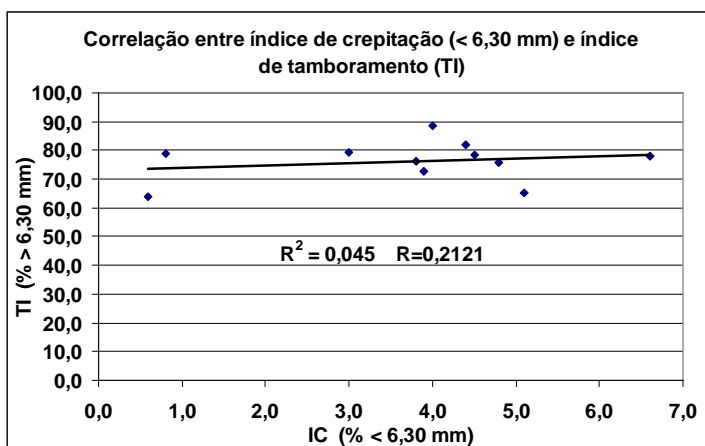


Figura 5.75 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e tamboramento.

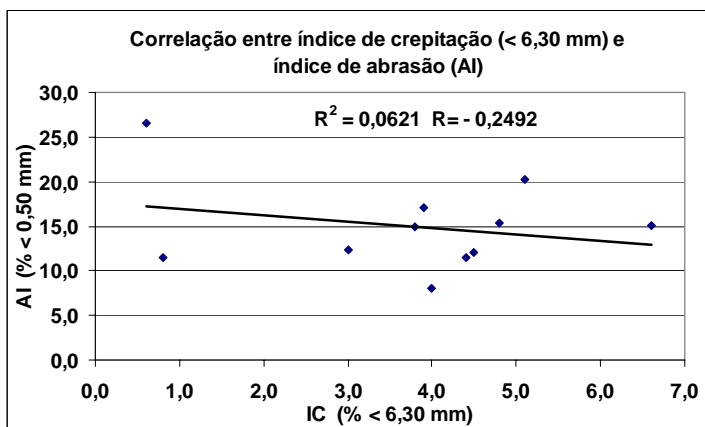


Figura 5.76 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e abrasão.

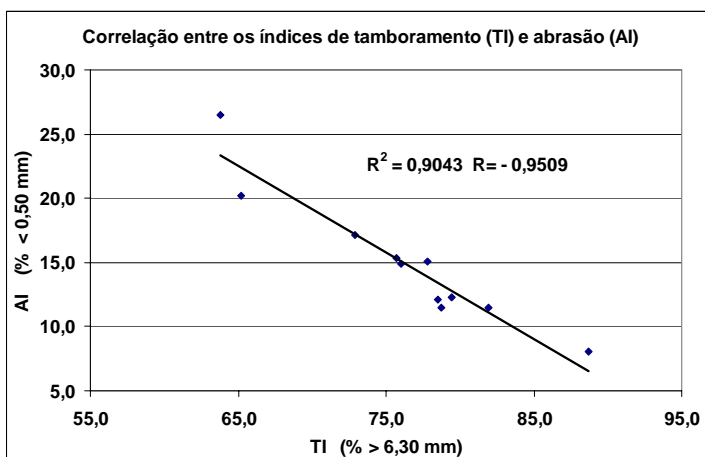


Figura 5.77 – Correlação entre índice de tamboramento e abrasão.

5.5 – Caracterização mineralógica das tipologias dos produtos granulados

A quantificação mineralógica ao microscópio ótico por tipologia teve como objetivo fundamental avaliar as diferenças significativas nas assembléias mineralógicas das tipologias e auxiliar na interpretação dos resultados metalúrgicos das amostras de produtos granulados objeto de estudo (vide anexos 4 e 5).

Nas tipologias compactas predominam hematitas granulares e, secundariamente, hematitas lamelares, martitas e hematitas sinuosas. O conjunto mineralógico de hematita microcristalina foi descrito apenas na amostra de LOCPX. O quartzo, goethita, gibbsita e magnetita são minerais secundários nesta tipologia, com baixos percentuais (figura 5.78).

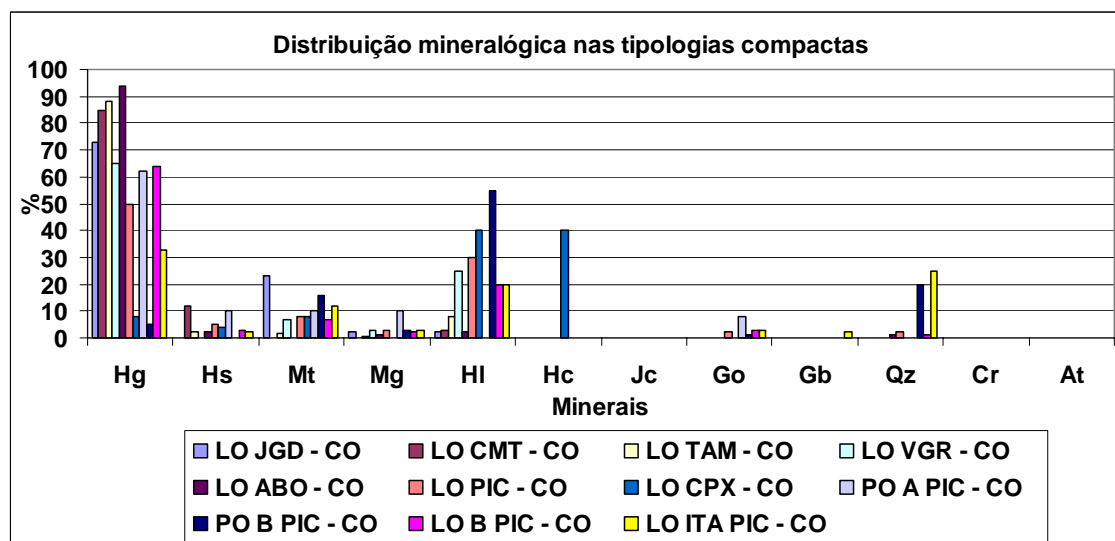


Figura 5.78 – Distribuição mineralógica nas tipologias compactas.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **Hl:** hem. lamelar; **Hc:** hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

Nas tipologias compactas porosas a distribuição é similar, mas ocorre um aumento relativo de hematitas lamelares e martitas e conseqüente redução de hematitas granulares (figura 5.79). Além de hematita microcristalina, foi descrito um mineral ferro

manganesífero denominado de jacobsita ((Mn⁺⁺,Fe⁺⁺,Mg) (Fe⁺⁺⁺,Mn⁺⁺⁺)₂O₄) na amostra LOCPX CP, constituindo-se em uma anomalia com relação às amostras objeto do trabalho. Os percentuais de magnetita são um pouco mais elevados, em relação às tipologias compactas.

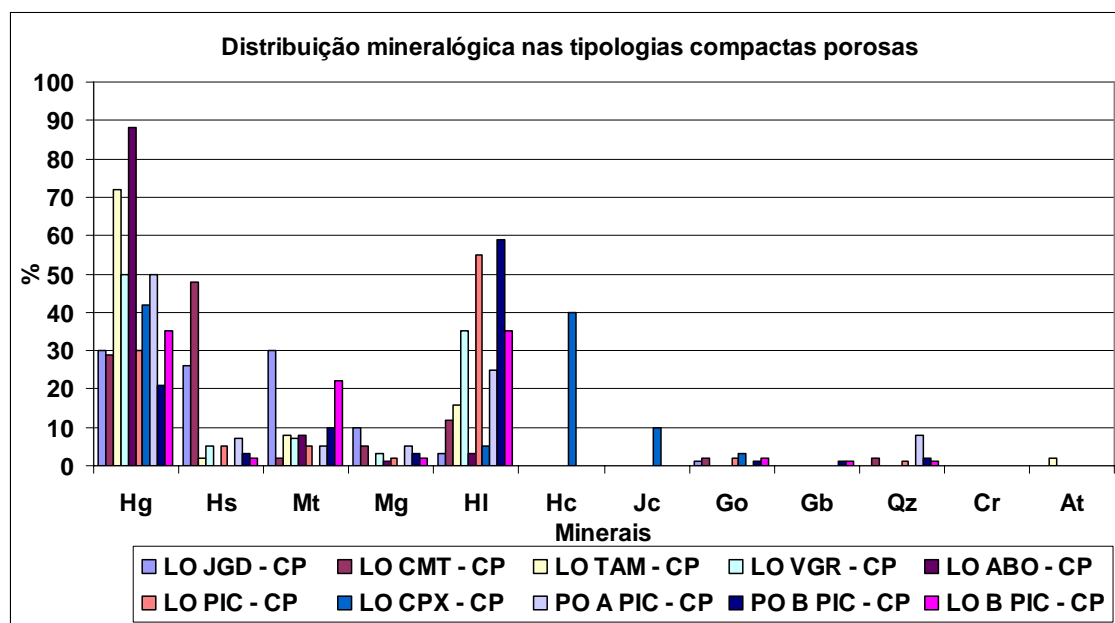


Figura 5.79 – Distribuição mineralógica nas tipologias compactas porosas.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar; **Hc:** hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

Nas tipologias porosas o aumento de hematitas lamelares e martitas é mais pronunciado, mas as hematitas granulares ainda predominam na média geral. Os percentuais de goethita e gibbsita são maiores, comparados às tipologias compactas e compactas porosas. Os percentuais de magnetitas e hematitas sinuosas são similares aos das tipologias compactas porosas. Os tipos goethíticos e gibbsíticos são mais elevados, denotando o enriquecimento supergênico como o principal responsável pela geração das tipologias porosas e conseqüente elevação dos percentuais dos minerais típicos de alteração intempérica (figura 5.80).

O mineral goethita predomina nas tipologias associadas à canga, resultante de níveis elevados de alteração dos minérios. Secundariamente, predominam martitas, hematitas

lamelares e granulares. A gibbsita é mais elevada, comparada às outras tipologias e o quartzo se apresenta em baixos percentuais. Em apenas uma amostra (LOJGD) foi descrito carbonato, provavelmente associado a hidrotermalismo. É extremamente importante enfatizar a presença de magnetita nas cangas, devido ao intenso processo de alteração intempérica. Denota uma forte resistência à oxidação da magnetita (FeO), permanecendo como “relictos”, principalmente do mineral martita, mesmo em condições severas de alteração (figura 5.81).

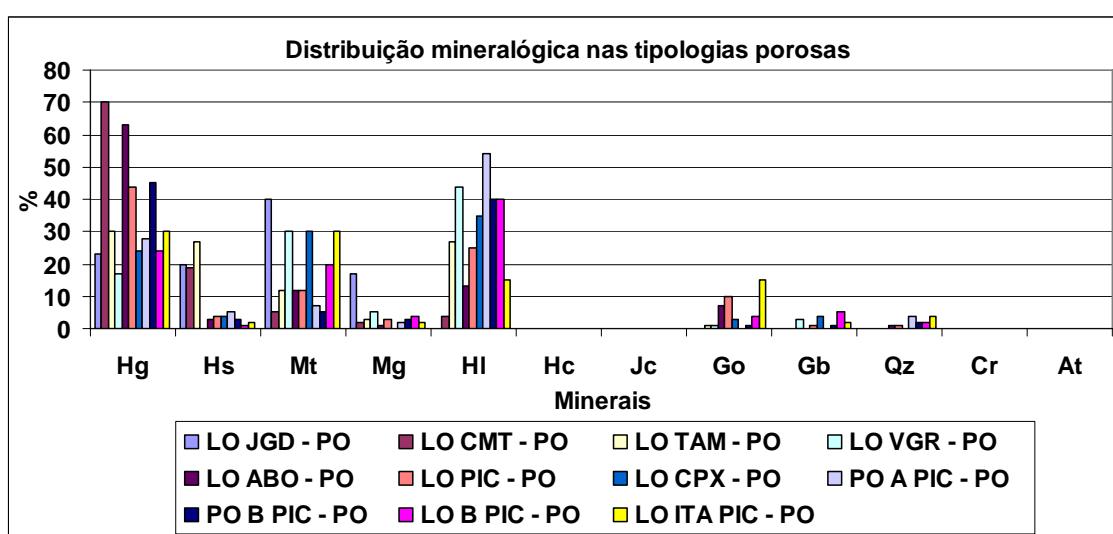


Figura 5.80 – Distribuição mineralógica nas tipologias porosas.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar; **Hc:** hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

Nas tipologias itabiríticas, embora representadas em apenas quatro amostras, predominam martitas, hematitas lamelares e quartzo. Os minerais goethita, gibbsita, hematitas granulares e magnetita são secundários. A redução de hematitas granulares e sinuosas, condizentes com estágios mais avançados de oxidação e recristalização e o conseqüente aumento das martitas, são interpretados como uma fase intermediária de oxidação das magnetitas (figura 5.82).

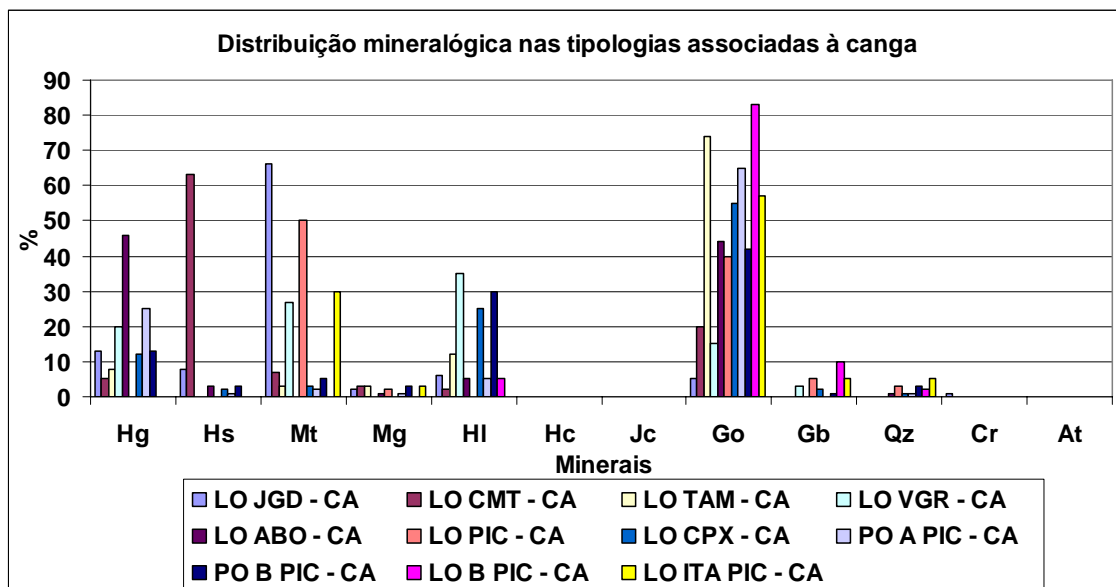


Figura 5.81 – Distribuição mineralógica nas tipologias associadas à canga.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

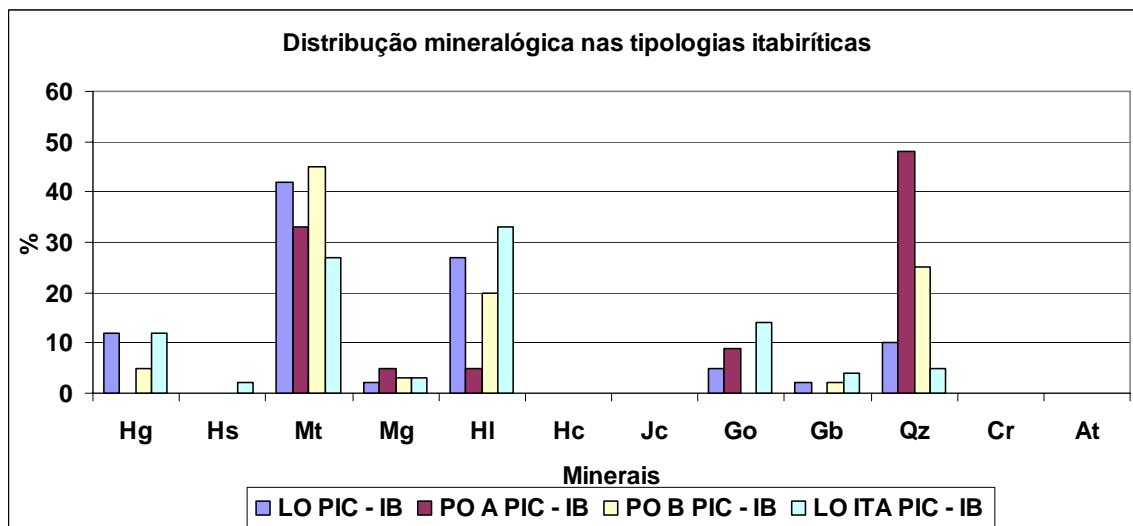


Figura 5.82 – Distribuição mineralógica nas tipologias itabiríticas.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

A tipologia proto-minério é decorrente da litologia primária da formação ferrífera, parcialmente alterada pelos processos supergênicos de enriquecimento. Predominam hematitas lamelares e granulares. As hematitas microcristalinas resultam de um baixo grau de recristalização dos minerais primários, também associadas a temperaturas mais baixas do ambiente geológico primário. A forte presença de gibbsita também reflete os minerais primários parcialmente alterados, permanecendo altos valores de alumina (Al_2O_3), parcialmente removidos nos processos de alteração (figura 5.83).

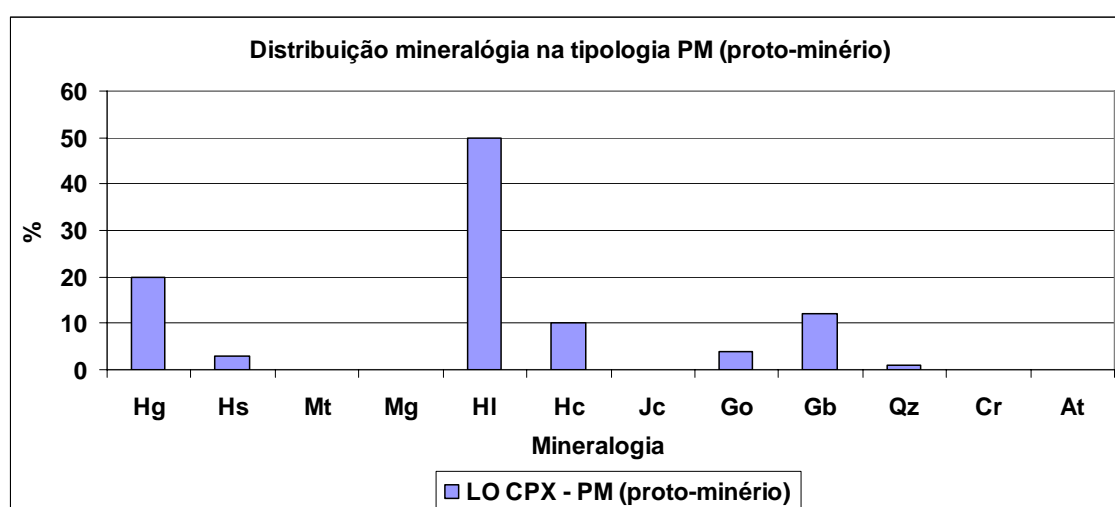


Figura 5.83 – Distribuição mineralógica na tipologia proto-minério.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar; **Hc:** hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

As hematitas granulares foram descritas em percentuais maiores nas tipologias compactas, compactas porosas e porosas e, secundariamente, nas tipologias associadas à canga, itabiritos e proto-minério (figura 5.84). Os minérios compactos e compactos porosos são constituídos por minerais com faces bem definidas, temperaturas mais elevadas de recristalização e um período de tempo maior para as reações químicas e oxidação da magnetita. Representam os tipos de minérios denominados de hipogênicos.

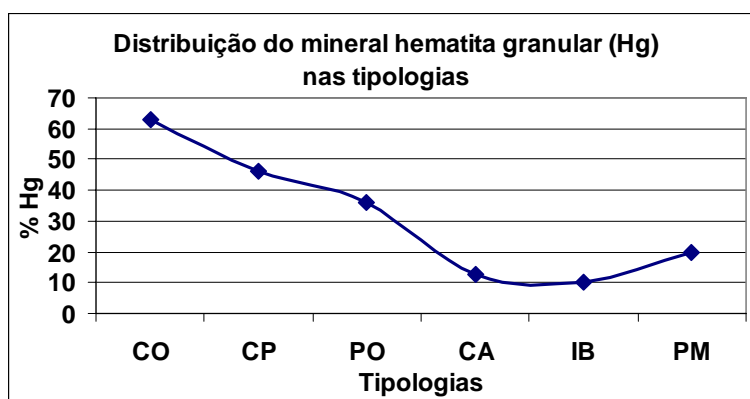


Figura 5.84 – Distribuição média da hematita granular nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

A hematita sinuosa é mais elevada nas tipologias compactas porosas, porosas e canga, sendo menor nos minérios compactos, itabiríticos e proto-minério. Representa o estágio final da martitização, imediatamente anterior à formação de hematitas granulares (figura 5.85).

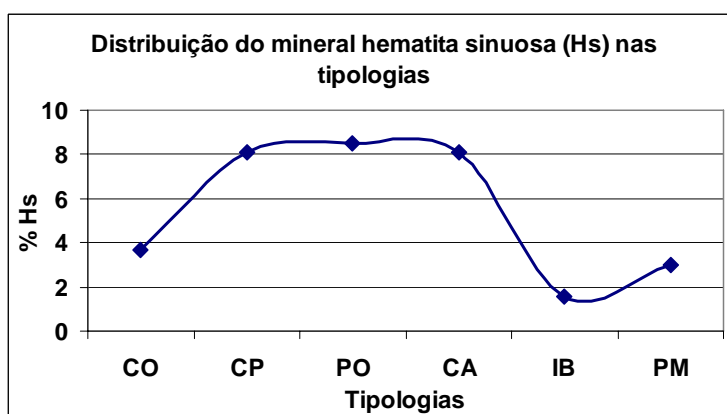


Figura 5.85 – Distribuição média da hematita sinuosa nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

As martitas estão com percentuais significativos nas tipologias porosas, associadas à canga e nas tipologias itabiríticas, tendo sido influenciadas por processos de alteração mais significativos. Não foram identificadas no proto-minério, interpretado como baixo

nível de alteração e apresentam distribuição menor nos tipos mais compactos (figura 5.86).

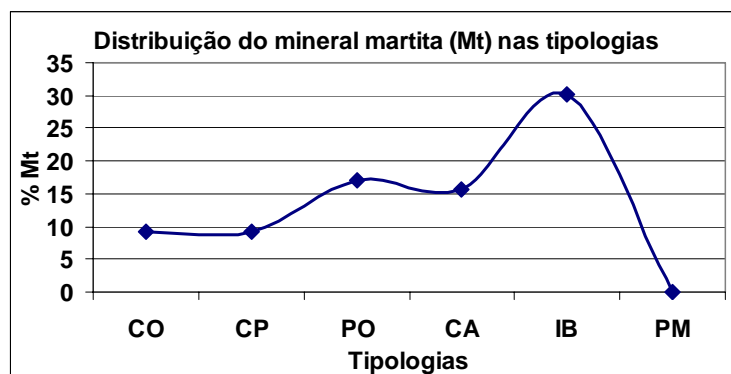


Figura 5.86 – Distribuição média da martita nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

A magnetita apresenta baixos percentuais de concentração em todas as amostras, demonstrando que a oxidação dos minérios primários das minas objeto do trabalho foi um evento generalizado no Quadrilátero Ferrífero. Não foi descrita na tipologia proto-minério (figura 5.87).

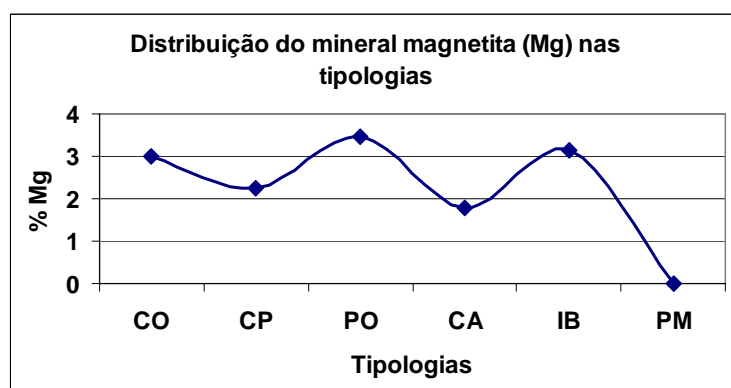


Figura 5.87 – Distribuição média da magnetita nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

A hematita lamelar está bem distribuída nos minérios compactos, porosos e itabiríticos, aumentando significativamente na tipologia proto-minério, onde predominam os

formatos mineralógicos de origem deformacional, em cima da rocha matriz. A redução nas tipologias associadas à canga é devido à alteração pronunciada que oblitera o formato original dos minerais (figura 5.88).

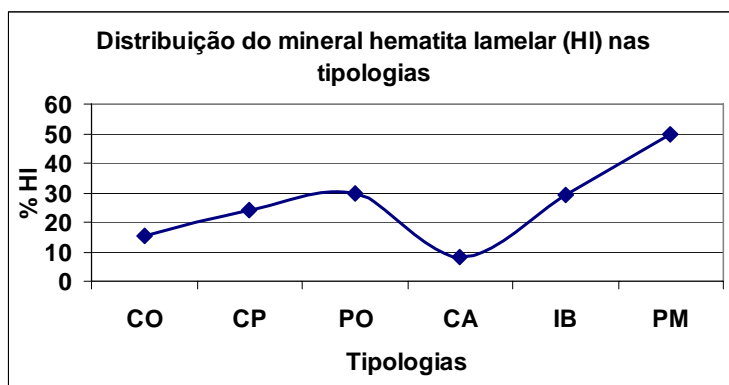


Figura 5.88 – Distribuição média da hematita lamelar nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

Os minerais hematita microcristalina e jacobsita (ferro manganésífero) foram descritos em amostras de LOCPX e representam uma diferenciação importante em relação às amostras objeto de estudo. O grau metamórfico é mais baixo, pelo tamanho menor dos minerais e uma proximidade maior das litologias primárias (figuras 5.89 e 5.90).

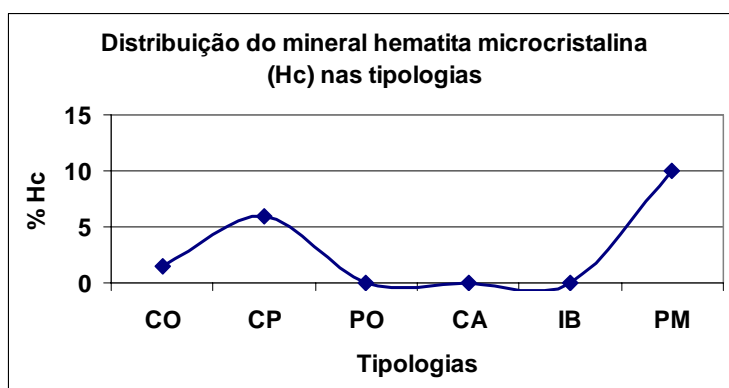


Figura 5.89 – Distribuição média da hematita microcristalina nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

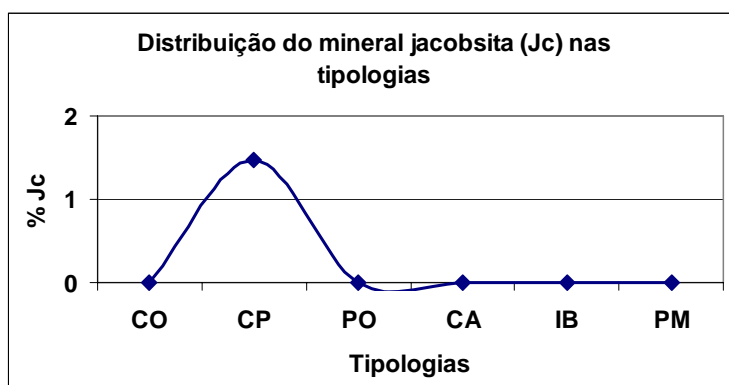


Figura 5.90 – Distribuição média da jacobscita nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

A goethita é elevada na tipologia associada à canga, pelo processo intempérico avançado da litologia, com forte hidratação e processos de substituições químicas elevadas (figura 5.91).

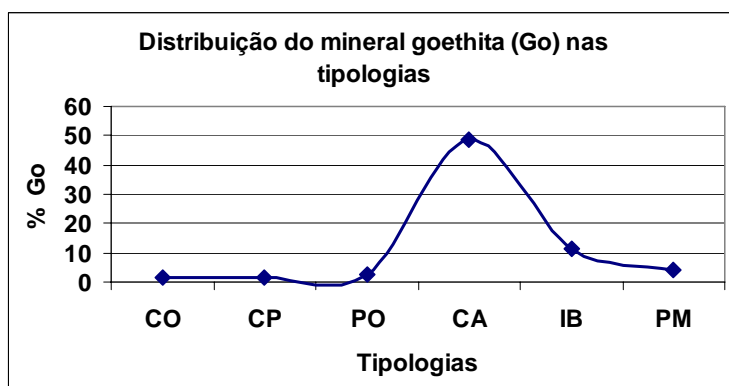


Figura 5.91 – Distribuição média da goethita nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

A gibbsita é mais elevada nas tipologias geradas por processos de alteração pronunciada. Na tipologia proto-minério, a alumina (Al_2O_3) é um importante constituinte químico da litologia primária, permanecendo na alteração parcial (figura 5.92).

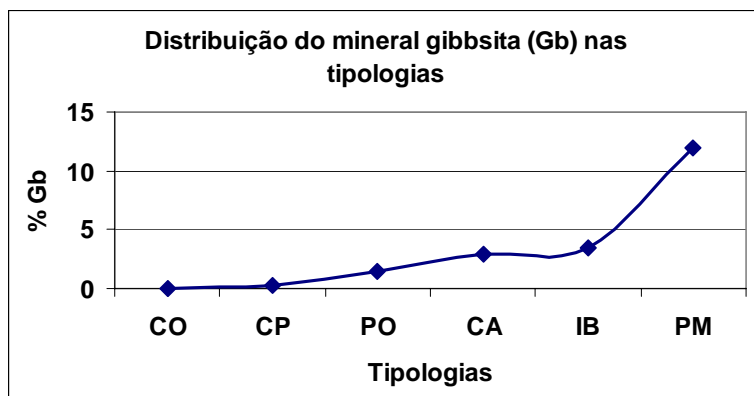


Figura 5.92 – Distribuição média da gibbsita nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

O quartzo é elevado nas tipologias itabiríticas, sendo um componente parcialmente lixiviado da rocha primária (figura 5.93).

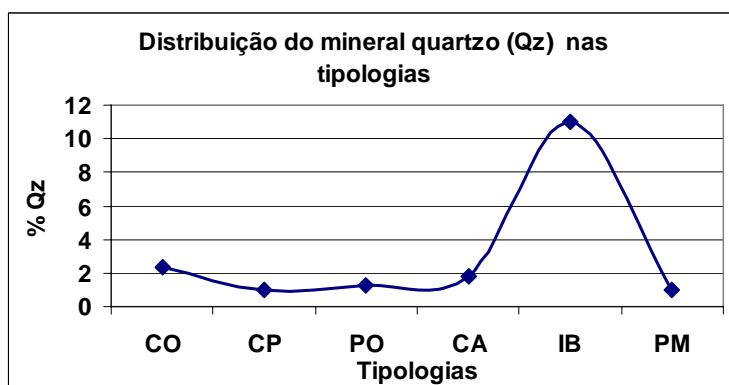


Figura 5.93 – Distribuição média do quartzo nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

O carbonato foi descrito em uma amostra de canga e representa provável associação mineralógica hidrotermal na Mina da Jangada (figura 5.94).

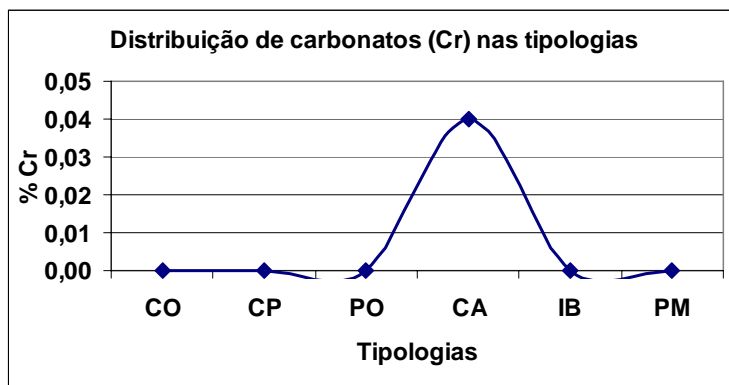


Figura 5.94 – Distribuição do carbonato nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

Os agregados terrosos representam minerais de difícil identificação ao microscópio óptico, geralmente de natureza argilosa e tem pouca representação nas amostras estudadas (figura 5.95).

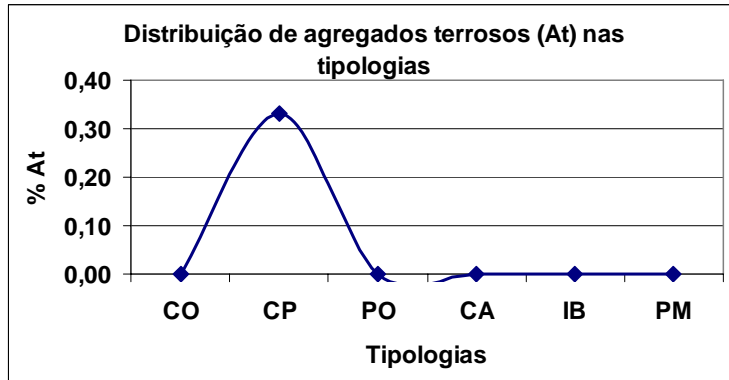


Figura 5.95 – Distribuição dos agregados terrosos nas tipologias.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

Na figura 5.96 estão sumariados os tamanhos médios dos minerais (em μm), sendo que a maioria dos minerais está abaixo de $50 \mu\text{m}$. Na tipologia proto-minério, o tamanho do quartzo é de $700,00 \mu\text{m}$, sendo interpretado como um baixo grau de recristalização, metamorfismo e deformação, permanecendo o tamanho primário do mineral (vide anexo 7).

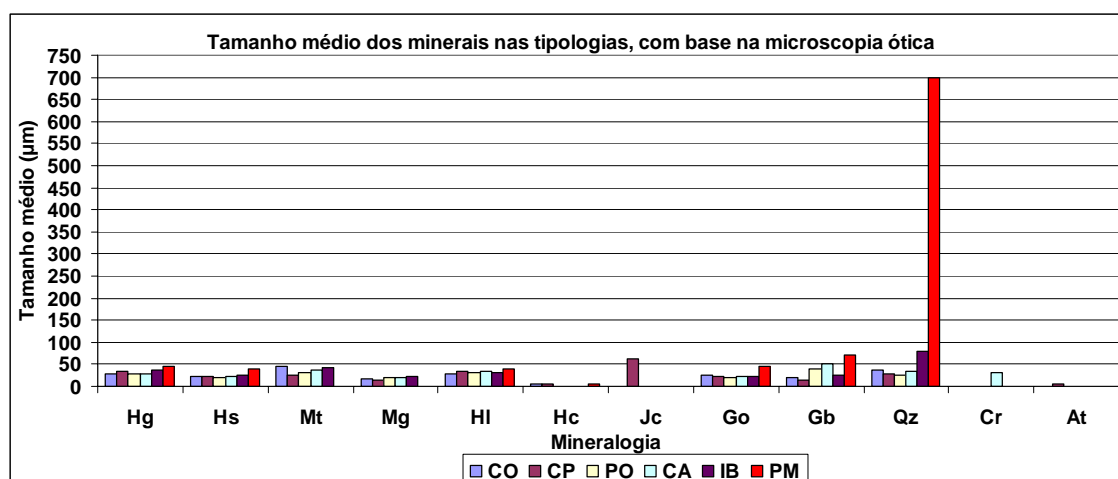


Figura 5.96 – Tamanho médio dos minerais (em μm) descritos nas tipologias.

Hg: hem. granular (27,13 a 45 μm); **Hs:** hem. sinuosa (21,30 a 40 μm); **Mt:** martita (24,80 a 42,50 μm); **Mg:** magnetita (15,56 a 23,75 μm); **HI:** hem. lamelar (29,35 a 40,00 μm); **Hc:** hem. microcristalina (6,25 μm); **Jc:** jacobsita (62,00 μm); **Go:** goethita (20,25 a 45,00 μm); **Gb:** gibbsita (13,50 a 70 μm); **Qz:** quartzo (26,17 a 700,00 μm); **Cr:** carbonato (30,00 μm); **At:** agregado terroso (5,00 μm).

Em termos de distribuição da porosidade descrita pela microscopia ótica, foram definidos três graus de porosidade: baixa (1= < 10 %); média (2= >10 e <20 %); alta (3= > 20 %). Na figura 5.97 consta a porosidade relativa média ponderada nas tipologias das amostras objeto de estudo. Os resultados denotam um aumento da porosidade com a redução da consistência dos fragmentos de minério (valores mais baixos nos minérios compactos e mais elevados nos minérios porosos). Na tipologia canga, os valores são mais elevados, pelo grau pronunciado de alteração, gerando quantidade significativa de espaços vazios internos nos fragmentos cangueificados, onde a percolação de fluídos de alteração foi muito significativa. A tipologia itabirítica apresenta valores médios de porosidade, pelo baixo grau de alteração dos fragmentos. As tipologias itabiríticas evoluem para tipologias porosas com o aumento do grau de alteração. A tipologia proto-minério tem alta porosidade pelo predomínio dos fragmentos compactos porosos e porosos, bem como altos percentuais de gibbsita, refletindo uma alteração pronunciada (vide anexo 5).

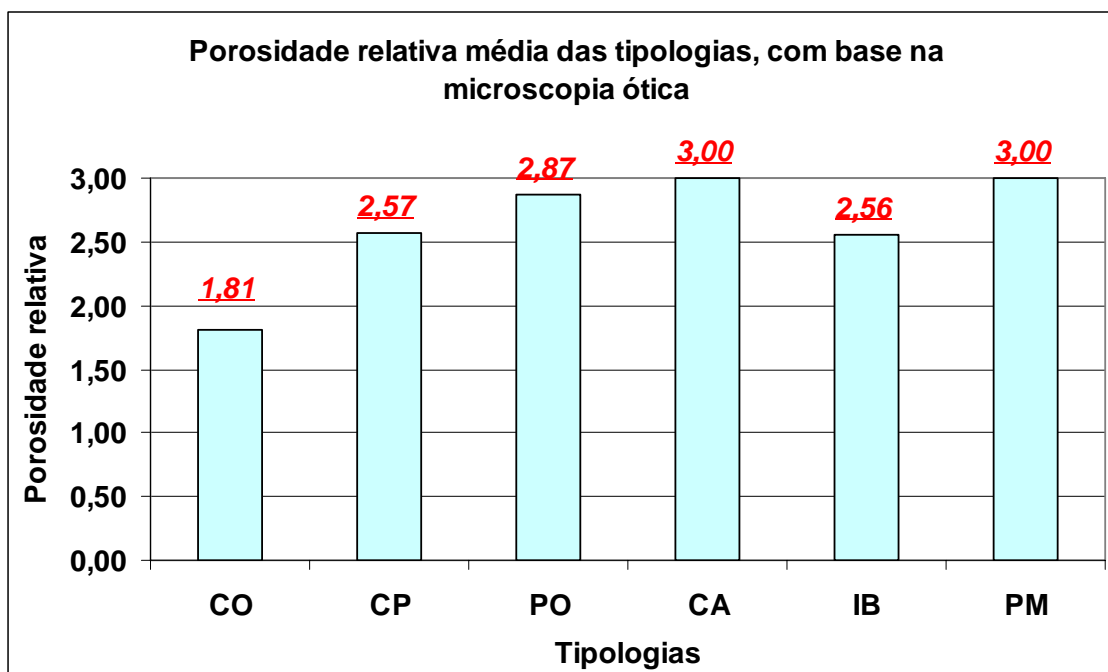


Figura 5.97 - Distribuição da porosidade relativa nas tipologias das amostras.

CO: 1 a 3; **CP:** 2 a 3; **PO:** 2 a 3; **CA:** 3; **IB:** 1 e 3; **PM:** 3.

Porosidade relativa = 1: < 10%; **2:** entre 10 e 20 %; **3:** > 20 %.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito;

PM: proto-minério.

Em termos de tamanho médio dos poros, a variação é semelhante à distribuição quantitativa dos mesmos, sendo os tamanhos menores associados às tipologias compactas e compactas porosas e os tamanhos maiores estão associados às tipologias porosas, cangas, itabiríticas e às caracterizadas como proto-minério (figura 5.98). Quanto maior o nível de alteração dos fragmentos, maior o tamanho dos poros, pela lixiviação dos minerais mais solúveis, durante a evolução dos eventos de alteração intempérica (vide anexo 6).

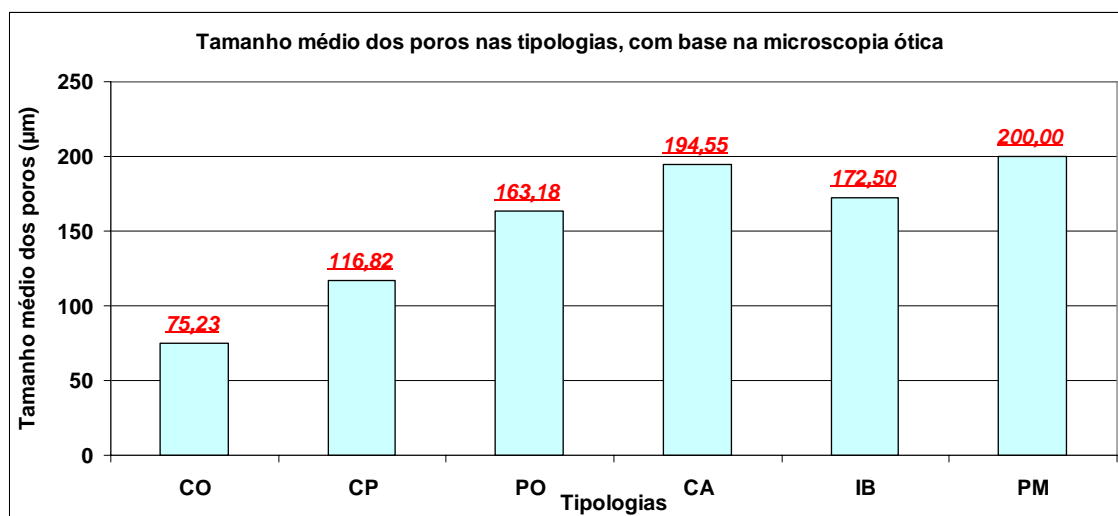


Figura 5.98 - Tamanho médio dos poros (em µm) associados às tipologias definidas nas amostras objeto de estudo.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito;

PM: proto-minério.

No anexo 4 encontram-se detalhadas as descrições mineralógicas das seções polidas das amostras ao microscópio ótico, onde estão incluídas as fotomicrografias dos principais minerais, texturas, relações de contato, tamanho, porosidade e outras.

5.6 – Caracterização química, tipológica e mineralógica das amostras de produtos granulados, aplicadas à interpretação dos resultados metalúrgicos

Com o objetivo de enfatizar a importância da caracterização metalúrgica dos granulados de minério de ferro, serão utilizados os resultados das análises químicas dos elementos maiores, avaliações dos percentuais das principais tipologias e as descrições mineralógicas, para efetuar as interpretações mais relevantes dos resultados metalúrgicos obtidos.

A tabela V.5 sumaria os resultados químicos dos elementos maiores que serão correlacionados com os índices metalúrgicos.

Tabela V.5 – Teores médios dos elementos maiores das amostras dos produtos.

Amostras/elem. maiores	Teores (%)			
	Fe total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	PPC (Perda ao fogo)
<i>LO JGD - Produto</i>	67,45	1,38	0,75	1,05
<i>LO CMT - Produto</i>	67,47	1,17	0,80	1,32
<i>LO TAM - Produto</i>	66,82	1,65	1,10	1,49
<i>LO VGR - Produto</i>	68,00	0,86	0,71	1,11
<i>LO ABO - Produto</i>	67,69	0,55	0,72	1,78
<i>LO PIC - produto</i>	68,64	0,10	0,10	1,32
<i>LO CPX - Produto</i>	64,31	0,35	2,95	2,38
<i>PO A PIC Produto</i>	67,49	1,20	0,76	1,20
<i>PO B PIC - produto</i>	62,64	7,21	0,93	2,10
<i>LO B PIC - produto</i>	66,55	0,96	1,25	1,94
<i>LO ITA PIC - Produto</i>	59,56	8,26	1,36	4,59

O grau de metalização (GM) é diretamente proporcional ao teor de ferro total (valor de correlação de 0,5084). Quanto maior o teor de ferro, mais facilmente o produto perde oxigênio para o gás redutor, durante o processo de redução direta (figura 5.99).

O grau de metalização (GM) e a sílica têm correlação inversamente proporcional, embora o resultado seja baixo (valor de -0,1559). A sílica dificulta a perda do oxigênio dos minerais para o gás redutor, durante a redução direta (figura 5.100).

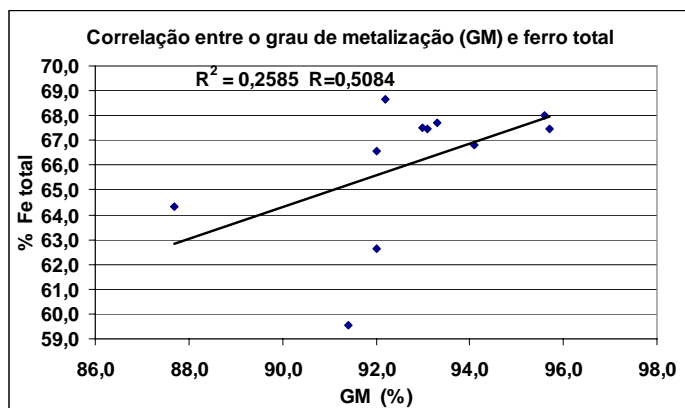


Figura 5.99 – Correlação entre grau de metalização e teor de ferro total.

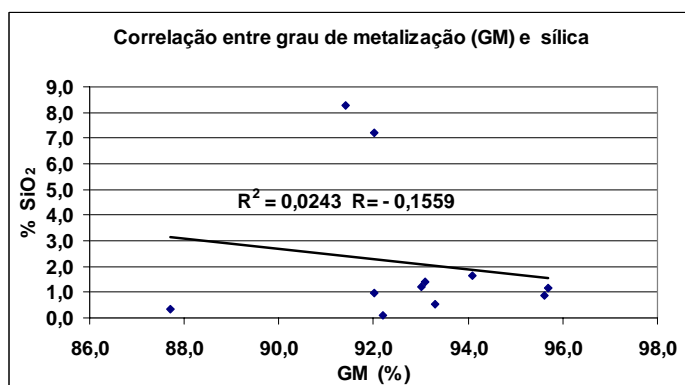


Figura 5.100 – Correlação entre o grau de metalização e teor de sílica.

A correlação entre os teores de alumina e o grau de metalização (GM) é inversamente proporcional (valor de -0,7373), com influência mais significativa, quando relacionada à variável sílica (figura 5.101).

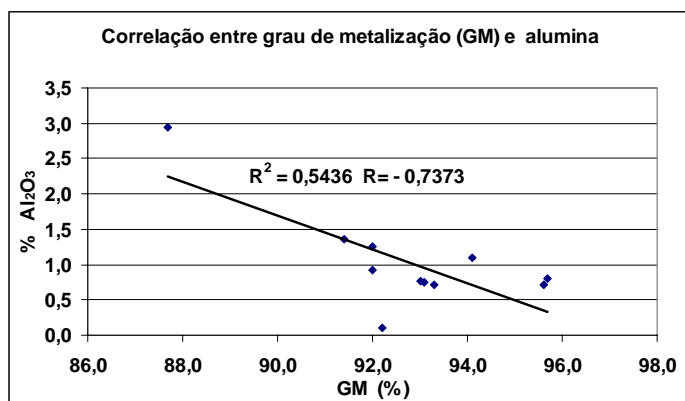


Figura 5.101 – Correlação entre o grau de metalização e teor de alumina.

A correlação entre o grau de metalização (GM) e a perda por calcinação (PPC) acompanha a variável química alumina, com correlação inversamente proporcional (valor de $-0,4977$). A presença de minerais mais hidratados originados por intemperismo supergênico eleva os valores de PPC e dificulta a ação dos gases redutores na redução direta de granulados (figura 5.102).

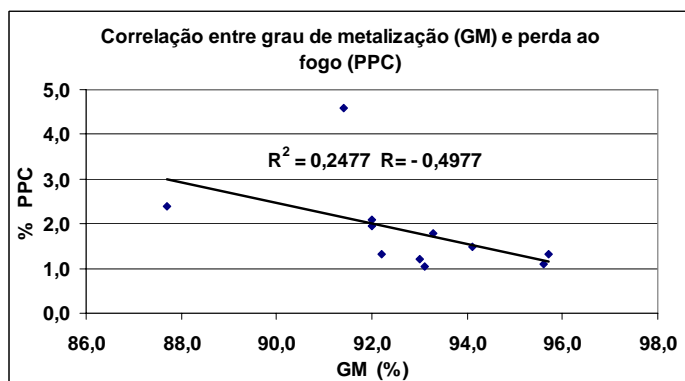


Figura 5.102 – Correlação entre o grau de metalização e perda por calcinação.

Os finos gerados (FG) durante a redução direta dentro do reator têm correlação inversamente proporcional aos teores de ferro total (valor de $-0,1327$). Embora o fator de correlação seja baixo, é importante salientar que quanto mais alto o teor de ferro, o percentual de finos gerados no processo de redução direta é menor, atribuindo a uma maior resistência do minério com menor percentual de contaminantes (figura 5.103).

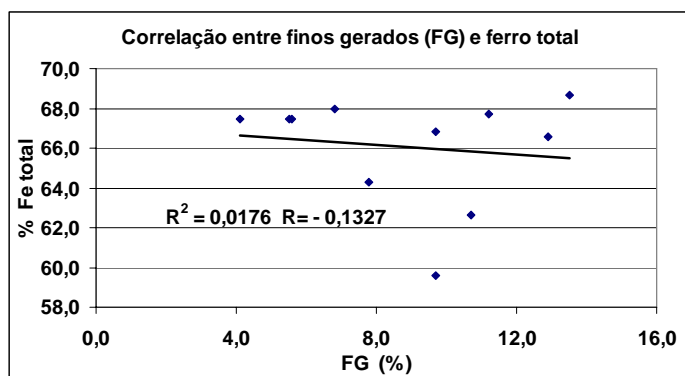


Figura 5.103 – Correlação entre finos gerados na redução direta e ferro total.

A correlação entre finos gerados e sílica é diretamente proporcional, embora o fator seja baixo (valor de 0,1204). O gráfico mostra duas amostras com alta sílica e com elevado percentual de finos gerados. A variável sílica mais elevada reduz a resistência do minério, aumentando os finos na redução direta (figura 5.104).

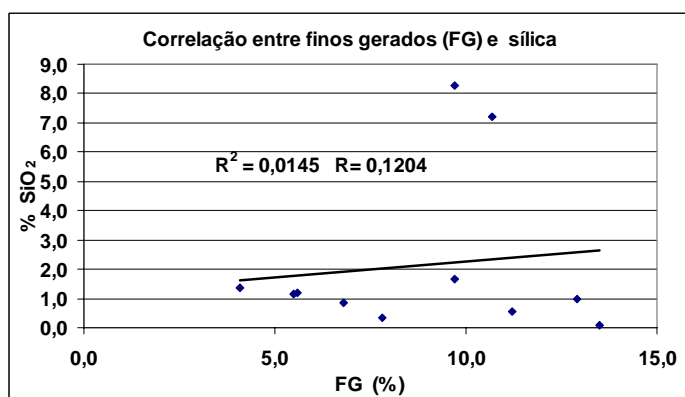


Figura 5.104 – Correlação entre finos gerados na redução direta e sílica.

A correlação entre finos gerados (FG) e alumina é baixa, sendo inversamente proporcional (valor de -0,1068), embora em algumas amostras a correlação seja diretamente proporcional. Esta variável química é pouco significativa nesta correlação, pois minérios mais aluminosos tendem a gerar mais finos, pela menor resistência, pelo processo de alteração mais pronunciado (figura 5.105).

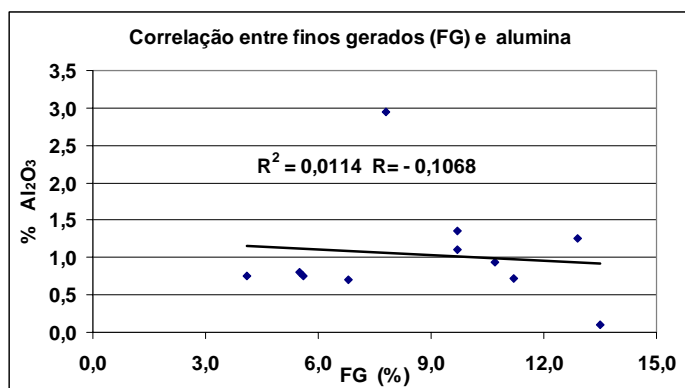


Figura 5.105 - Correlação entre finos gerados na redução direta e alumina.

Ao contrário da variável alumina, a perda por calcinação (PPC) apresentou resultados mais coerentes, sendo diretamente proporcional aos finos gerados na redução direta (valor de 0,2909). Quanto mais alterados os minérios, com percentuais mais elevados de minerais hidratados, menor resistência no processo de redução direta (figura 5.106).

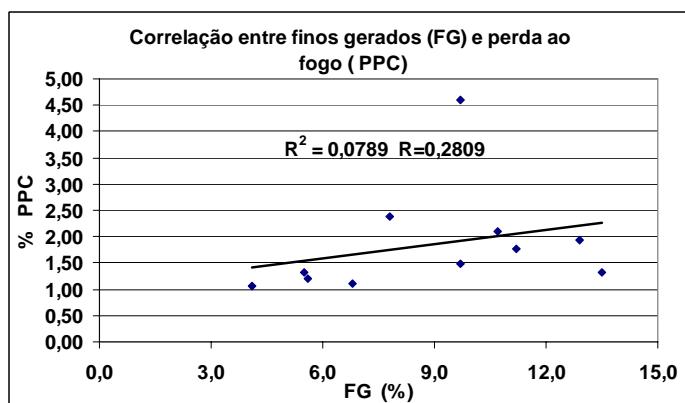


Figura 5.106 - Correlação entre finos gerados na redução direta e perda por calcinação.

A correlação entre a liberação de enxofre e ferro total é inversamente proporcional (valor de -0,4995). Os minérios com teores mais baixos de ferro, geralmente são mais alterados, situados próximos à superfície, onde os teores de enxofre são mais elevados (figura 5.107).

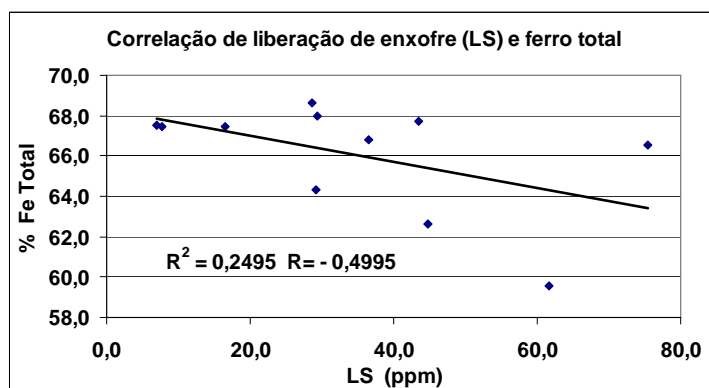


Figura 5.107 – Correlação entre liberação de enxofre e ferro total.

Com relação à variável sílica, a liberação de enxofre é diretamente proporcional (valor de 0,4175). As amostras com alta sílica coincidentemente estão muito alteradas, refletindo na correlação positiva com o enxofre. Em condições normais, considerando um minério pouco alterado, esta correlação é mais baixa (figura 5.108).

A correlação entre liberação de enxofre e alumina é diretamente proporcional (valor de 0,1970), sendo decorrente da alteração mais pronunciada dos minérios, elevando os teores de enxofre e minerais argilosos aluminosos (figura 5.109).

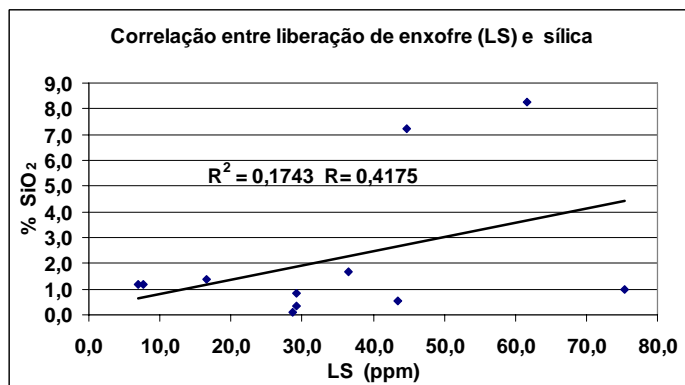


Figura 5.108 – Correlação entre liberação de enxofre e sílica.

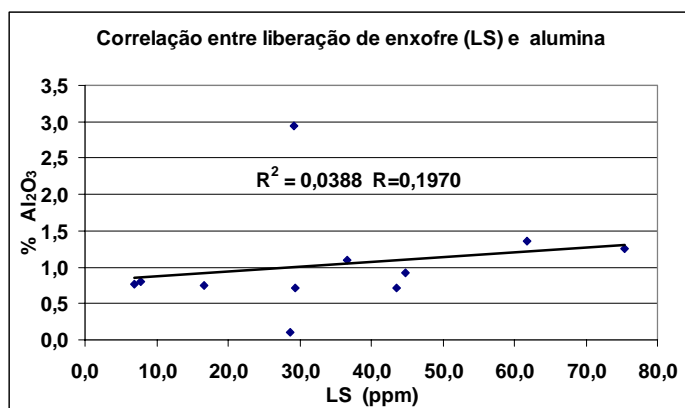


Figura 5.109 – Correlação entre liberação de enxofre e alumina.

A perda por calcinação acompanha a alumina, decorrente da presença de minerais hidratados, estabelecendo uma forte correlação positiva com a liberação de enxofre (valor de 0,6084). Os minérios que sofreram a ação mais pronunciada do intemperismo concentram os minerais hidratados, elevando a perda por calcinação (figura 5.110).

A correlação entre os índices de redutibilidade e ferro total é inversamente proporcional (valor de -0,4410), demonstrando que minérios com altos teores de ferro, quando submetidos à redução, apresentam maior dificuldade de remoção de oxigênio do óxido de ferro, pois a porosidade e permeabilidade são menores (figura 5.111).

Os teores de sílica são diretamente proporcionais aos índices de redutibilidade (valor de 0,6023), mostrando que minérios mais silicosos são mais facilmente redutíveis, sendo mais frágeis e permeáveis aos gases redutores (figura 5.112).

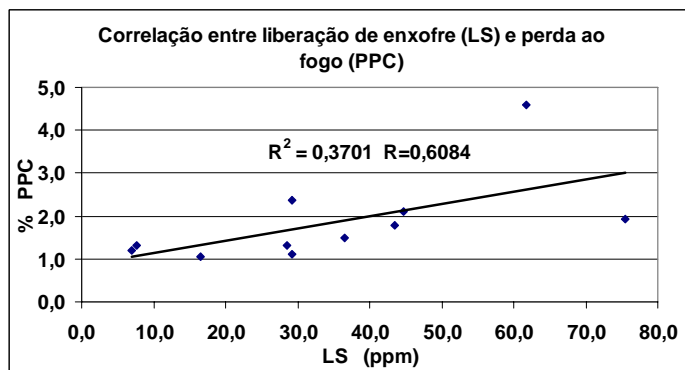


Figura 5.110 – Correlação entre liberação de enxofre e perda por calcinação.

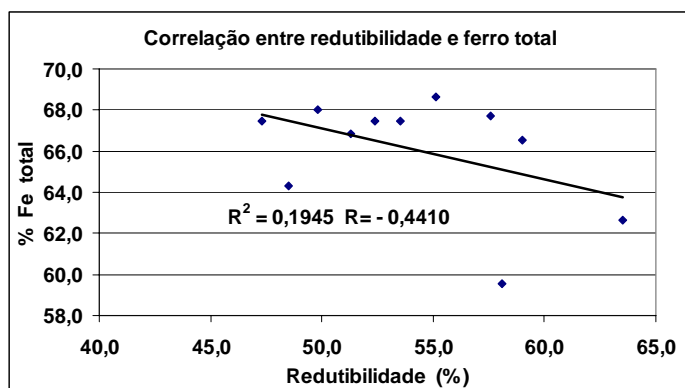


Figura 5.111 – Correlação entre redutibilidade e ferro total.

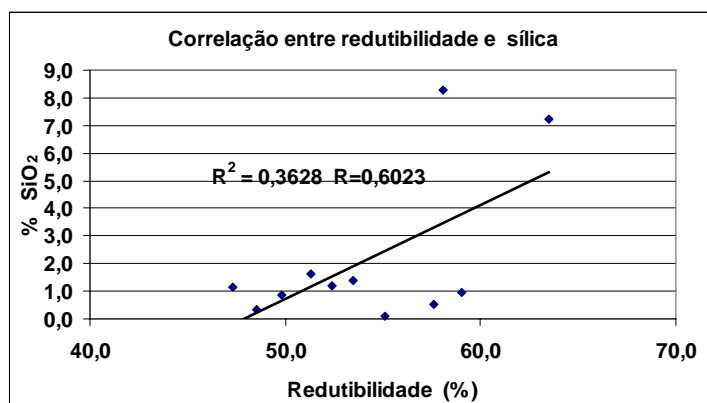


Figura 5.112 – Correlação entre redutibilidade e sílica.

A correlação entre redutibilidade e alumina é fracamente negativa (valor de -0,2225), demonstrando que a alteração dos minérios que elevam os teores de alumina, não necessariamente facilita a redução, dependendo de um conjunto de características químicas, mineralógicas e tipológicas (figura 5.113).

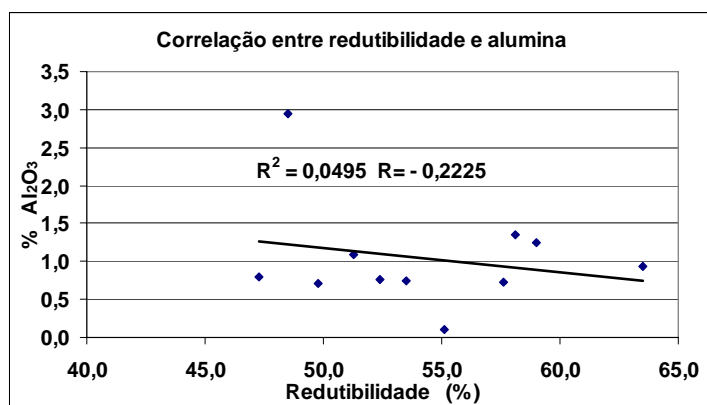


Figura 5.113 – Correlação entre redutibilidade e alumina.

A correlação positiva da redutibilidade com a perda por calcinação (valor de 0,3657) sugere que os minerais hidratados auxiliam no processo de remoção de oxigênio dos óxidos de ferro (figura 5.114).

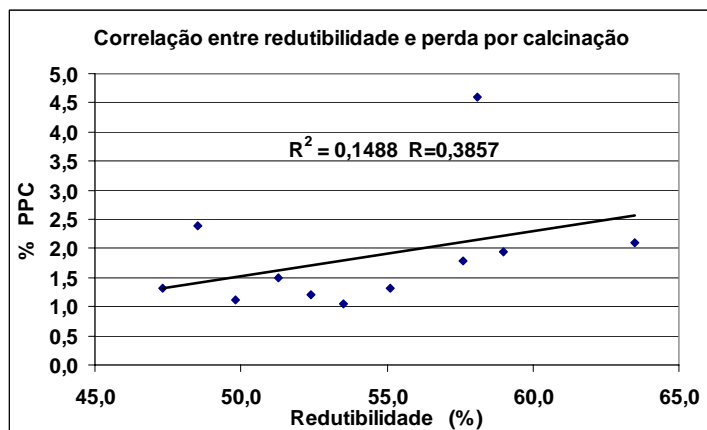


Figura 5.114 – Correlação entre redutibilidade e perda por calcinação.

O índice RDI e a variável ferro total tem correlação fortemente inversamente proporcional (valor de -0,7339). Os teores mais elevados de ferro estão associados aos minérios mais compactos, menos alterados, com menor grau de degradação durante a redução (figura 5.115).

A correlação entre RDI e sílica é fortemente positiva (valor de 0,7950). Quanto mais elevado o teor de sílica, maior a geração de finos durante a redução, causada pela maior fragilidade dos minerais associados ao quartzo no bandamento composicional entre os óxidos de ferro e sílica (figura 5.116).

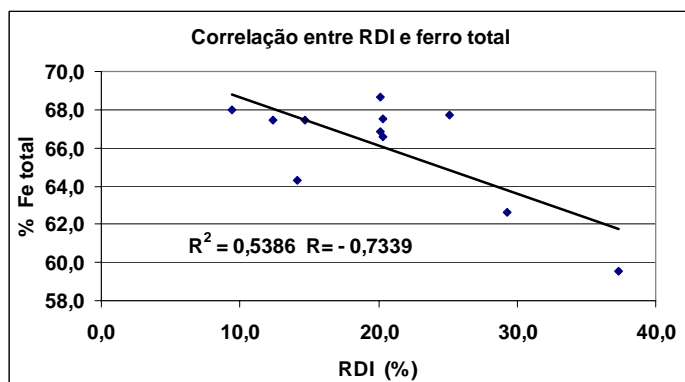


Figura 5.115 – Correlação entre RDI e ferro total.

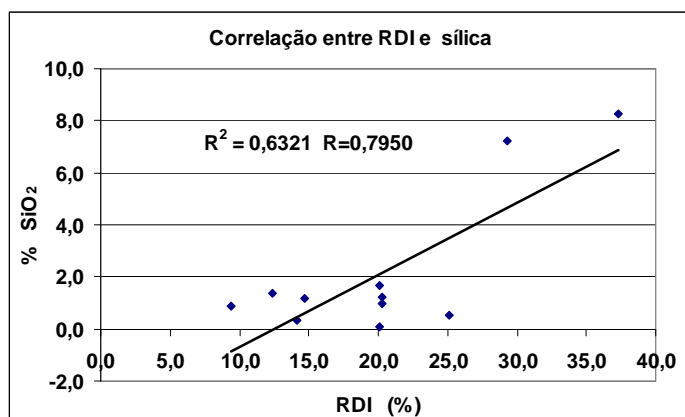


Figura 5.116 – Correlação entre RDI e sílica.

Praticamente não existe correlação entre RDI e alumina (valor de $-0,0265$). A alteração dos minérios afeta de forma insignificante esta variável metalúrgica, pois prevalecem o processo de substituição dos elementos trivalentes, como o Fe^{+++} e Al^{+++} , com pouca interferência na estrutura geral do minério que poderia afetar o RDI (figura 5.117).

A correlação entre RDI e perda por calcinação é fortemente positiva (valor de $0,7754$). A explicação mais plausível é a presença de minerais hidratados interferindo na degradação durante a redução, principalmente durante a perda de água alojada na estrutura dos minerais, fragilizando-os durante o processo (figura 5.118).

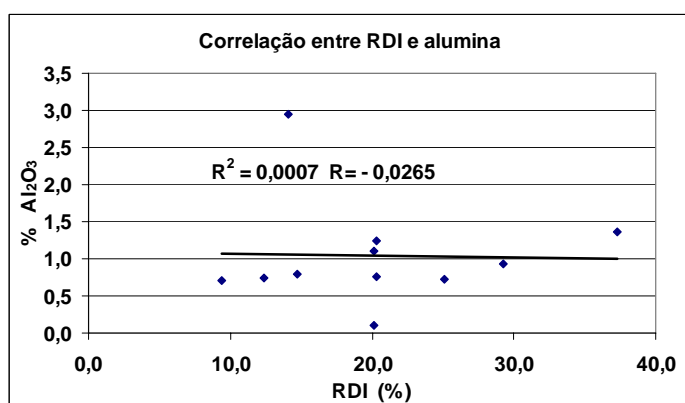


Figura 5.117 – Correlação entre RDI e alumina.

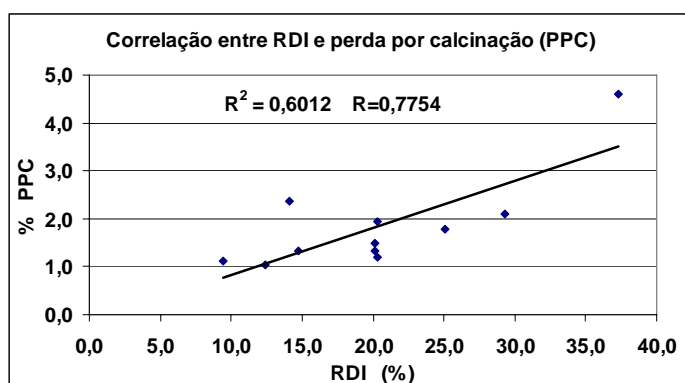


Figura 5.118 – Correlação entre RDI e perda por calcinação.

As correlações entre os dois índices de crepitação (frações <4,75 mm e <6,30 mm) e os teores de ferro total são fortemente positivas (valores de 0,7188 e 0,7386, respectivamente). Os teores elevados de ferro estão associados com minérios menos alterados (baixo nível de contaminantes), apresentando baixo percentual de minerais hidratados, sendo mais susceptíveis à crepitação (figuras 5.119 e 5.120).

Os índices de crepitação (frações <4,75 mm e <6,30 mm) têm correlações inversamente proporcionais com a variável sílica (valores de -0,4189 e -0,4361, respectivamente). Minérios mais silicosos tendem a ser mais porosos e permeáveis, pela alteração supergênica e o bandamento composicional, gerando uma menor quantidade de finos, quando submetidos a choque térmico (figura 5.121 e 5.122).

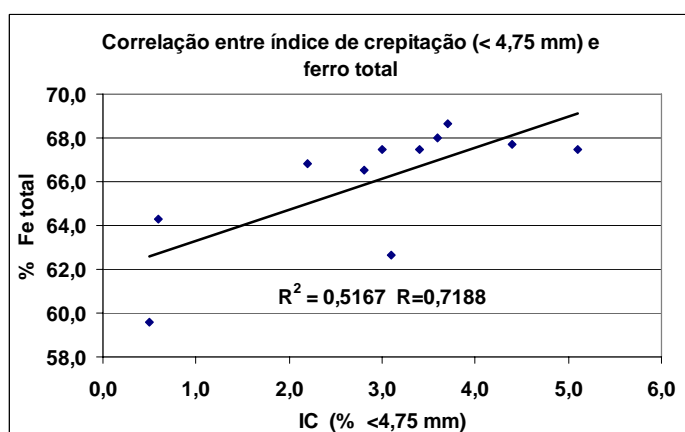


Figura 5.119 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e ferro total.

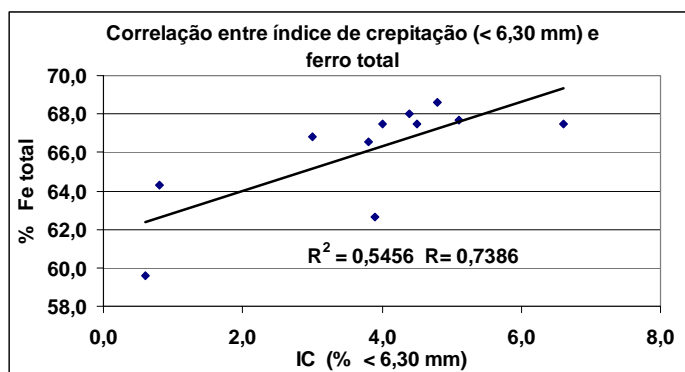


Figura 5.120 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e ferro total.

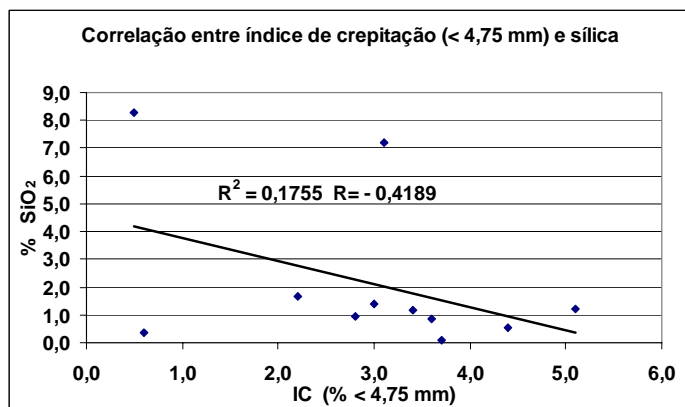


Figura 5.121 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e sílica.

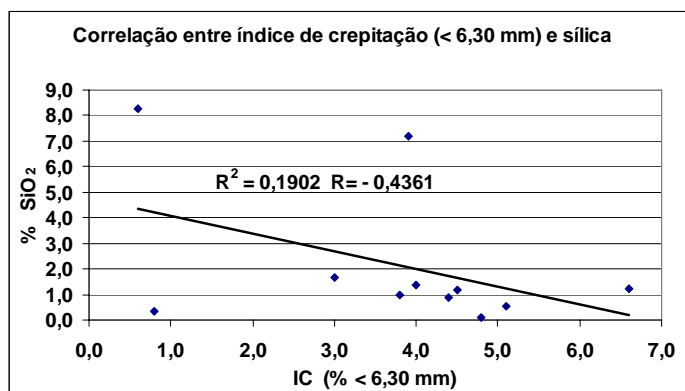


Figura 5.122 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e sílica.

A variável química alumina tem correlação inversamente proporcional aos índices de crepitação, nas frações <4,75 mm e <6,30 mm (valores de -0,7373 e -0,7403, respectivamente). A explicação mais coerente está relacionada à porosidade, pois embora ocorra aumento dos argilo-minerais, onde os teores de alumina são mais

elevados, a porosidade decorrente da alteração maior, permite a saída do vapor d'água e uma conseqüente redução dos índices de crepitação com o aumento da alumina (figuras 5.123 e 5.124).

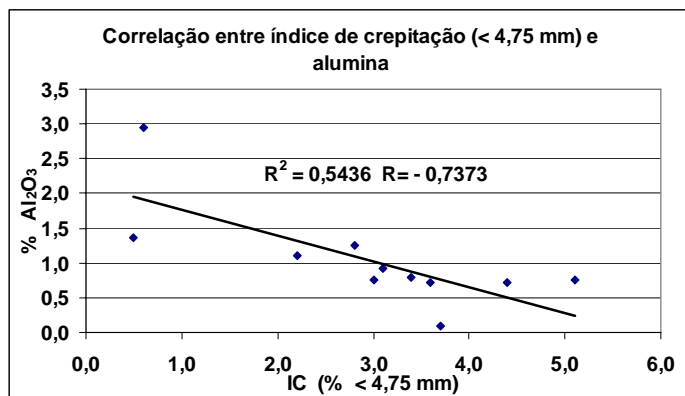


Figura 5.123 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e alumina.

A perda por calcinação acompanha a alumina, quando correlacionada aos índices de crepitação nas frações <4,75 mm e <6,30 mm (valores de -0,7230 e -0,7547, respectivamente). Os resultados confirmam a presença dos minerais hidratados e a porosidade gerada nos processos de alteração facilitando o escoamento do vapor d'água (figuras 5.125 e 5.126).

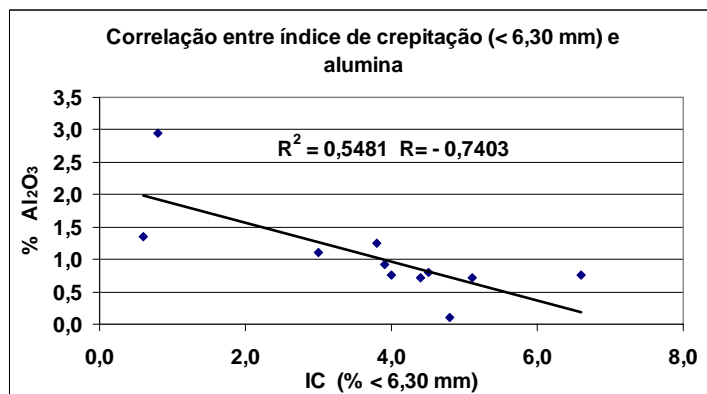


Figura 5.124 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e alumina.

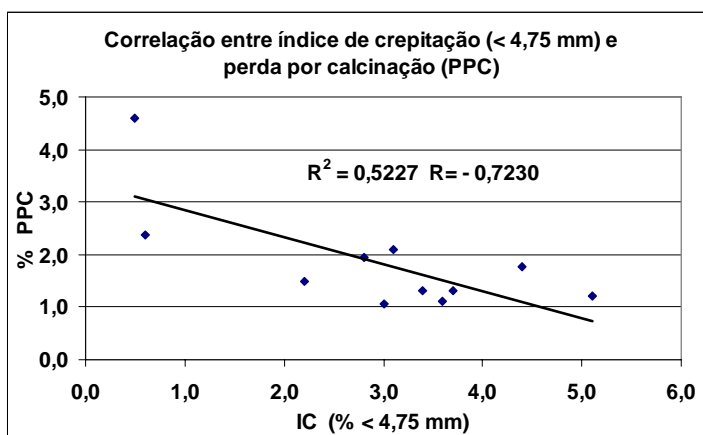


Figura 5.125 – Correlação entre índice de crepitação (<4,75 mm) e perda por calcinação.

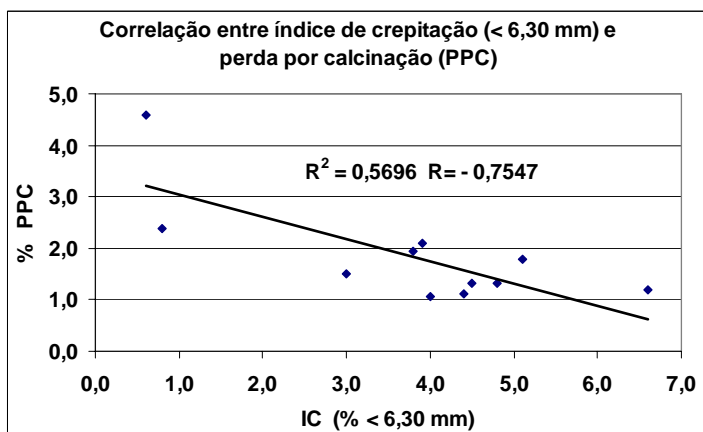


Figura 5.126 – Correlação entre índice de crepitação (<6,30 mm) e perda por calcinação.

A correlação entre índice de tamboramento e ferro total é diretamente proporcional (valor de 0,5340), relacionada a um menor nível de alteração do minério com teor mais alto de ferro e apresentando maior resistência mecânica (figura 5.127). Na figura 5.128 consta a correlação inversa entre índice de abrasão e teor de ferro total (valor de -0,6398). Os percentuais de finos abaixo de 0,50 mm são menores, nos minérios menos alterados e com teores mais altos de ferro total. Minérios mais alterados apresentam teores menores de ferro total e menos resistência mecânica, com índices de tamboramento mais baixos e índices de abrasão mais elevados.

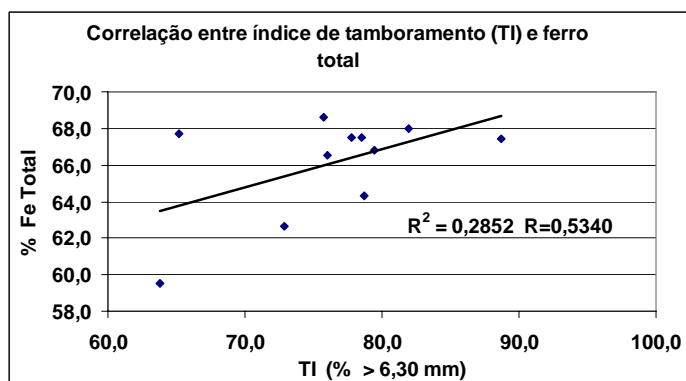


Figura 5.127 – Correlação entre índice de tamboramento e teor de ferro total.

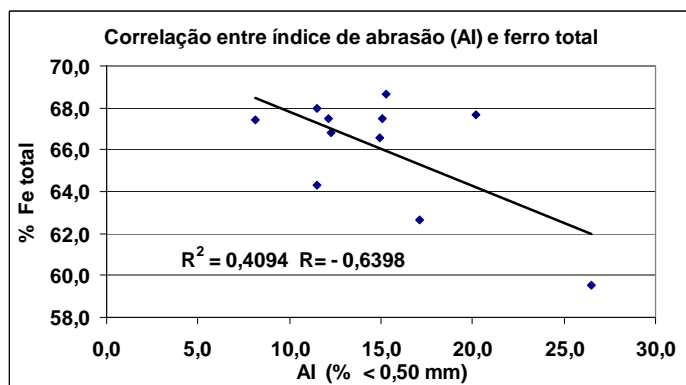


Figura 5.128 – Correlação entre índice de abrasão e teor de ferro total.

Os índices de tamboramento variam inversamente proporcional em relação à variável sílica (valor de -0,5069). O aumento da sílica fragiliza o minério, reduzindo o índice de tamboramento (figura 5.129). Em contrapartida, os índices de abrasão se comportam de forma oposta, sendo diretamente proporcionais à variável sílica (valor de 0,6558). Valores mais elevados dos índices de abrasão correspondem a minérios mais silicosos, com menor resistência ao manuseio (figura 5.130).

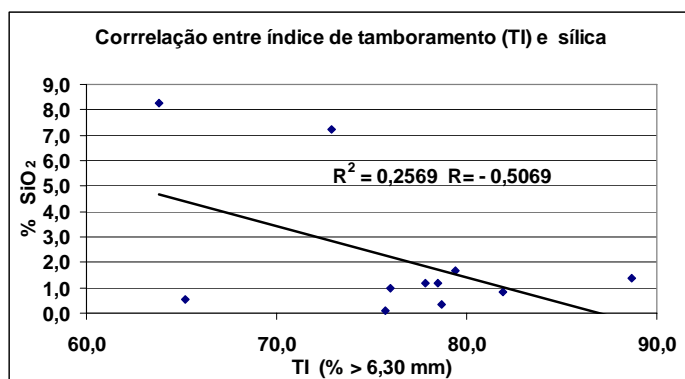


Figura 5.129 – Correlação entre índice de tamboramento e teor de sílica.

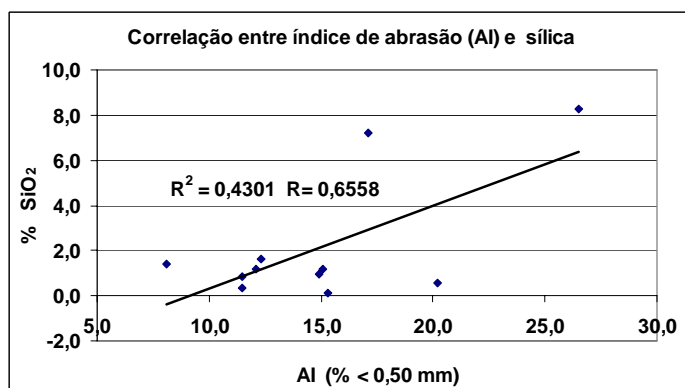


Figura 5.130 – Correlação entre índice de abrasão e teor de sílica.

As correlações entre a variável alumina e os índices de tamboramento e abrasão são muito baixas (valores de -0,0245 e -0,0424, respectivamente). Os resultados das amostras consideradas no trabalho, não mostraram interdependências significativas entre as variáveis consideradas (figuras 5.131 e 5.132). A interpretação considerada mais razoável está associada ao grau de alteração. Os minérios mais aluminosos sofreram uma alteração mais pronunciada, apresentando menor resistência mecânica. Em decorrência disso, os índices de tamboramento seriam mais baixos e os índices de abrasão seriam mais elevados.

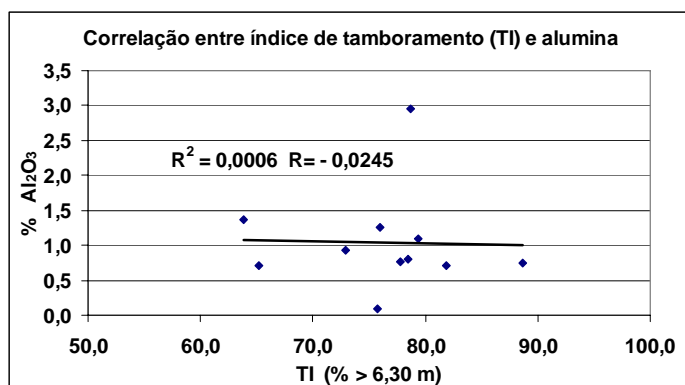


Figura 5.131 – Correlação entre índice de tamboramento e alumina.

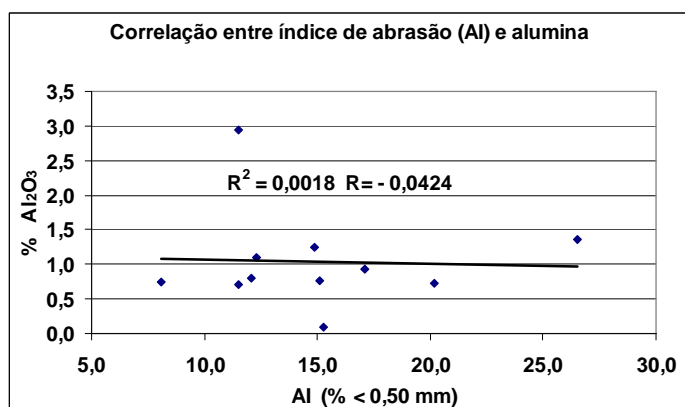


Figura 5.132 – Correlação entre índice de abrasão e alumina.

Contrariando a variável alumina, a perda por calcinação tem forte correlação negativa com os índices de tamboramento (valor de -0,7032) e uma forte correlação positiva com os índices de abrasão (valor de 0,7949). Minérios com perdas de calcinações maiores estão associados a minerais hidratados, tornando os fragmentos mais frágeis, reduzindo os índices de tamboramento e elevando a geração de finos pelo índice de abrasão. Por outro lado, minérios menos hidratados, com menor nível de alteração, apresentam menores valores de perda por calcinação, índices de tamboramento mais elevados e índices de abrasão menores (figuras 5.133 e 5.134).

A perda por calcinação tem uma forte correlação com os teores de alumina, mas as correlações com os índices que mensuram a resistência mecânica dos produtos granulados de minério de ferro, são diferentes. A mineralogia deve ser muito importante para explicar os comportamentos, principalmente os minerais hidratados.

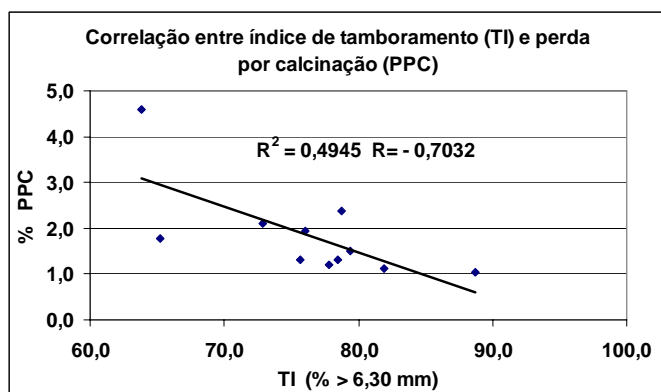


Figura 5.133 – Correlação entre índice de tamboramento e perda por calcinação.

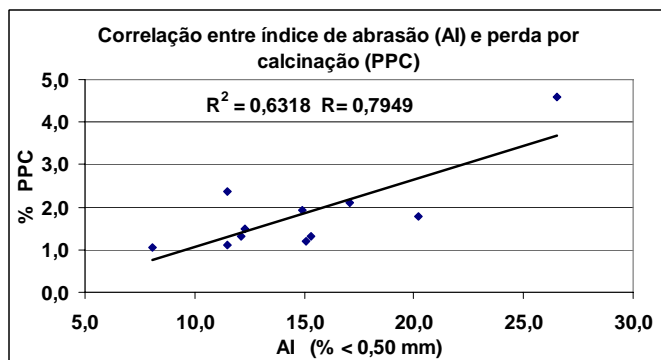


Figura 5.134 – Correlação entre índice de abrasão e perda por calcinação.

A tabela V.6 sumaria todas as correlações entre os ensaios metalúrgicos e as principais variáveis químicas detalhadas nas figuras anteriores. Foram consideradas baixas correlações os coeficientes situados entre -0,3 e +0,3. Este fato não significa que essas correlações não são significativas, pelo baixo número de informações submetidas à avaliação na tese. Estudos adicionais, aumentando a população de amostras, poderão tornar as correlações mais significativas, principalmente com variações genéticas significativas dos tipos de minérios objeto de estudo.

Tabela V.6 – Quadro resumo das correlações entre as variáveis metalúrgicas e as principais variáveis químicas.

Variáveis Metalúrgicas	Variáveis químicas principais			
	Fe Total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	PPC
Grau de metalização (GM)	↑	↔	↓	↓
Finos gerados (FG)	↔	↔	↔	↔
Liberção enxofre (LS)	↓	↑	↔	↑
Redutibilidade	↓	↑	↔	↑
RDI	↓	↑	↔	↑
Índice de crepitação (<4,75 mm)	↑	↓	↓	↓
Índice de crepitação (<6,30 mm)	↑	↓	↓	↓
Índice de tamboramento (TI)	↑	↓	↔	↓
Índice de abrasão (AI)	↓	↑	↔	↑
Obs:			↑	
Correlação diretamente proporcional (+)			↓	
Correlação inversamente proporcional (-)			↔	
Correlação baixa (entre - 0,3 e + 0,3)				

Após as considerações mais relevantes das influências das principais variáveis químicas nos índices metalúrgicos considerados no trabalho, serão enfatizadas as inter-relações da metalurgia com as principais tipologias descritas nas amostras de granulados.

O aumento do grau de metalização tem uma forte relação com percentuais mais elevados das tipologias compactas e, secundariamente, compacta porosas (figura 5.135). As amostras com grau de metalização menor (LOCPX e LOITAPIC) são constituídas por percentuais menores de fragmentos compactos, embora a amostra de LOCPX contenha percentual significativo da tipologia compacta porosa e proto-minério, com elevados teores de alumina.

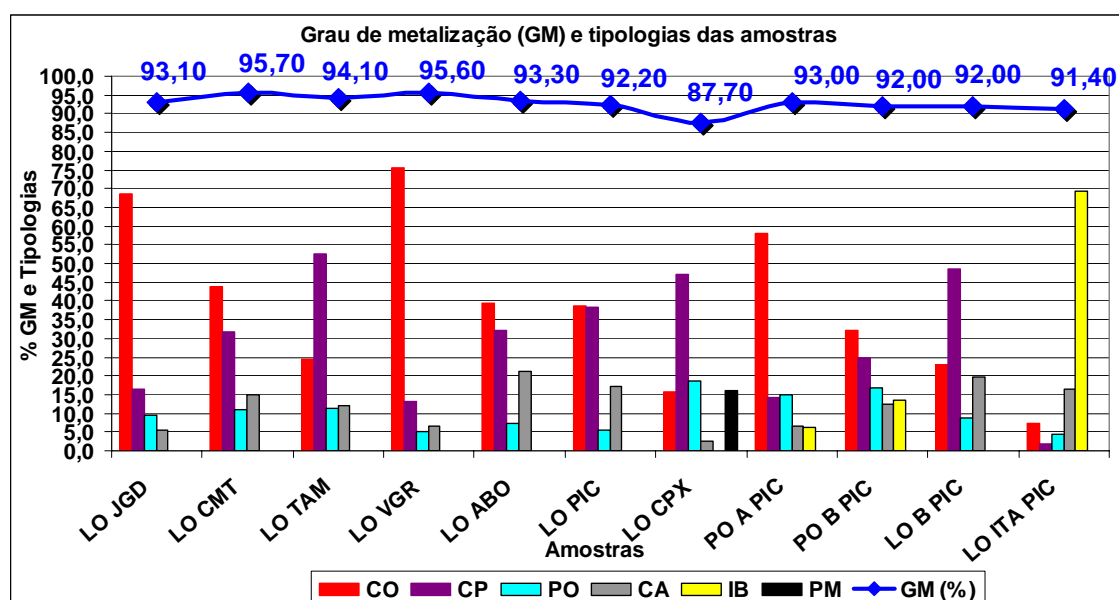


Figura 5.135 – Associação do grau de metalização com as principais tipologias.

CO: compacta; **CP:** compacta porosa; **PO:** porosa; **CA:** canga; **IB:** itabirito;

PM: proto-minério.

A figura 5.136 mostra uma linha de tendência de redução relativa dos fragmentos compactos na mesma direção da curva do grau de metalização que sinaliza redução dos valores no mesmo sentido. Os fragmentos tipológicos de natureza compacta porosa variam no mesmo sentido, com uma linha de tendência de menor ângulo, mas com alta variabilidade (figura 5.137). As tipologias compactas e compactas porosas estão

associadas a graus de metalização mais elevados pela menor alteração dos fragmentos e apresentam teores mais elevados de ferro total pela presença de menos contaminantes.

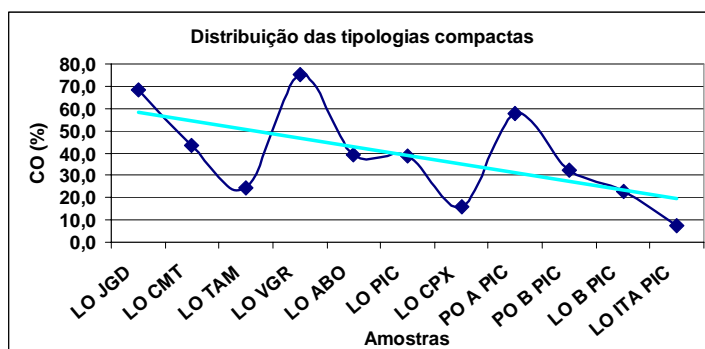


Figura 5.136 – Distribuição dos percentuais das tipologias compactas e a linha de tendência dos valores.

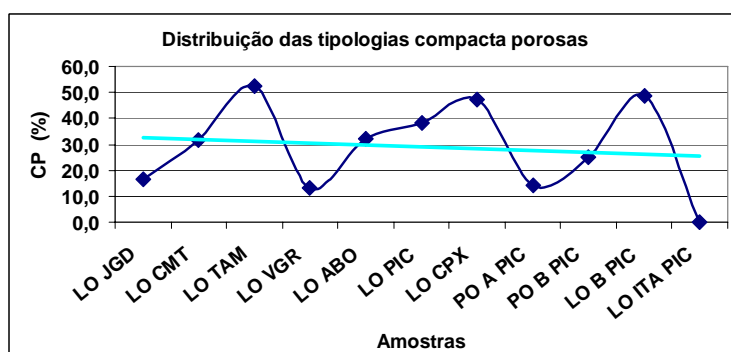


Figura 5.137 – Distribuição dos percentuais das tipologias compactas porosas e a linha de tendência dos valores.

Os finos gerados aumentam com os percentuais maiores das tipologias porosas, minérios associados à canga, itabiritos e fragmentos de proto-minério (figuras 5.138, 5.139, 5.140, 5.141 e 5.142), resultantes da ação mais pronunciada do intemperismo, alterando as características primárias. Os processos de ação dos agentes intempéricos ao longo do tempo fragilizam os minérios, principalmente nas porções intrínsecas, envolvendo as microestruturas das rochas, tendo como resultante, a mudança substancial do comportamento metalúrgico. Conforme figuras 5.136 e 5.137, a conseqüente redução relativa dos fragmentos compactos e compactos porosos, contribui com o aumento dos finos gerados no processo de redução direta.

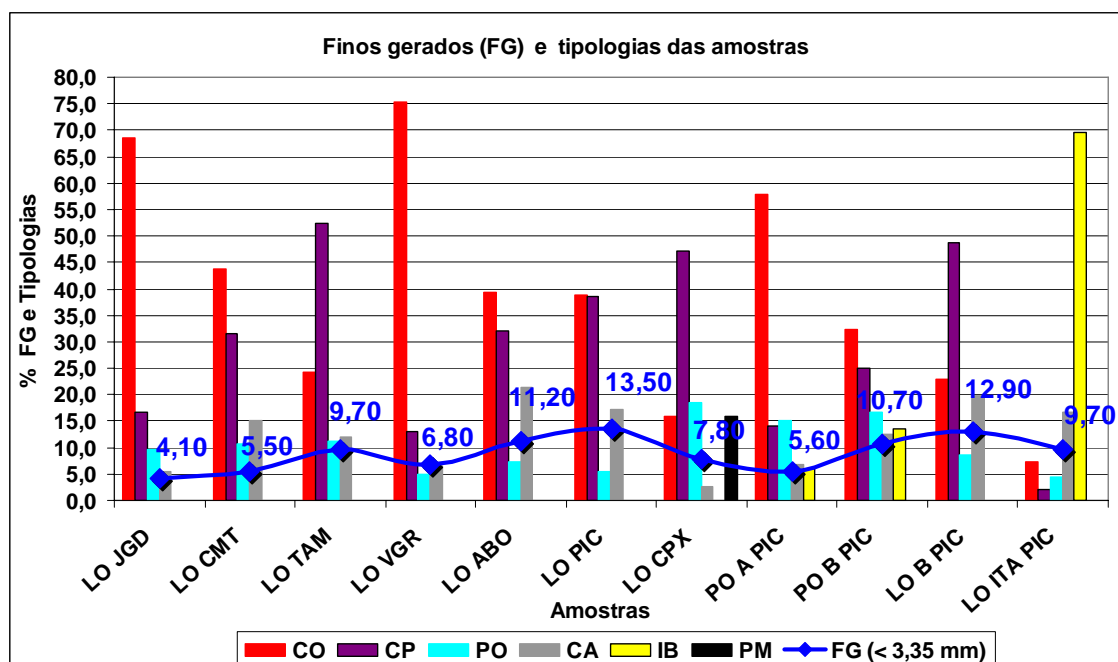


Figura 5.138 - Associação dos finos gerados com as principais tipologias.

CO: compacta; **CP:** compacta porosa; **PO:** porosa; **CA:** canga; **IB:** itabirito;

PM: proto-minério.

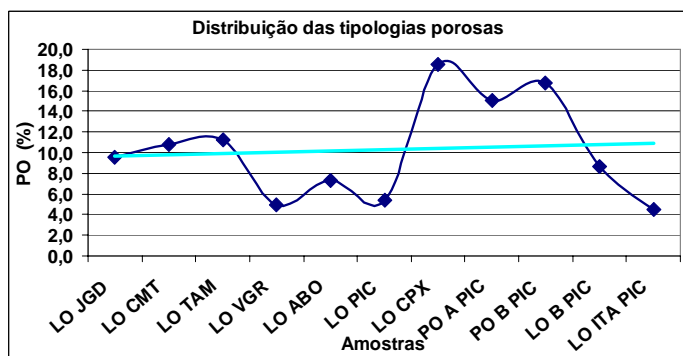


Figura 5.139 - Distribuição dos percentuais das tipologias porosas e a linha de tendência dos valores, com variabilidade elevada.

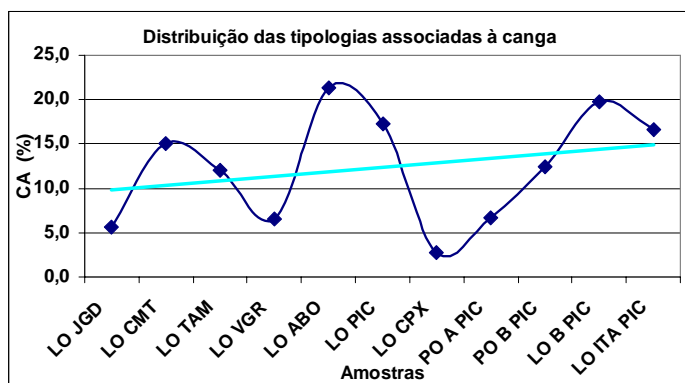


Figura 5.140 - Distribuição dos percentuais das tipologias associadas à canga e a linha de tendência dos valores.

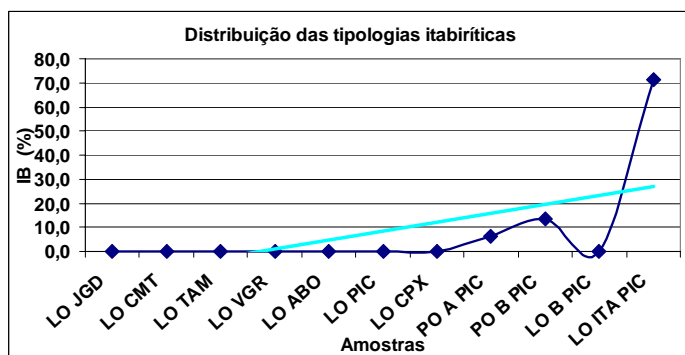


Figura 5.141 - Distribuição dos percentuais das tipologias itabiríticas e a linha de tendência dos valores, onde a tipologia foi determinada.

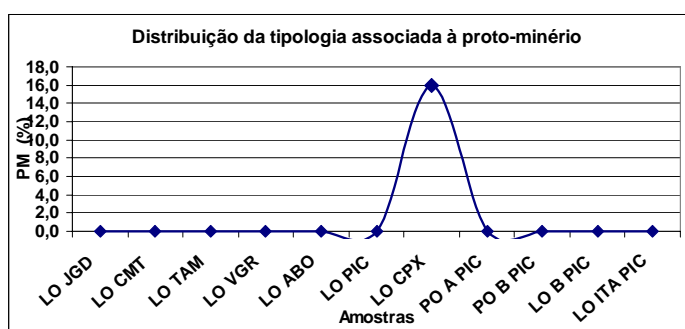


Figura 5.142 - Distribuição do percentual da tipologia de proto-minério, originada da alteração incompleta do minério dolomítico primário.

Os valores mais elevados de liberação de enxofre encontram-se correlacionados com os percentuais mais altos de minérios associados à canga. O alto grau de intemperismo dos minérios situados próximos à superfície, ou zonas fraturadas com percolação profunda

de água, é compatível com a proliferação de matéria orgânica, que eleva substancialmente os teores de enxofre. As tipologias itabiríticas e porosas mostram também uma relação direta com a liberação de enxofre, principalmente os minérios mais porosos, derivados da atuação dos processos supergênicos. As tipologias compactas e compacta porosas demonstram uma associação mais pronunciada com os minérios com menor liberação de enxofre, portanto menos alterados. Os proto-minérios estão relacionados às tipologias porosas, portanto o efeito na liberação de enxofre tende a ser semelhante (figura 5.143). As amostras LOABO e LOPIC têm percentuais médios de tipologias compactas e compactas porosas, mas com alto percentual de canga, razão pela qual os valores de liberação de enxofre são medianos a elevados.

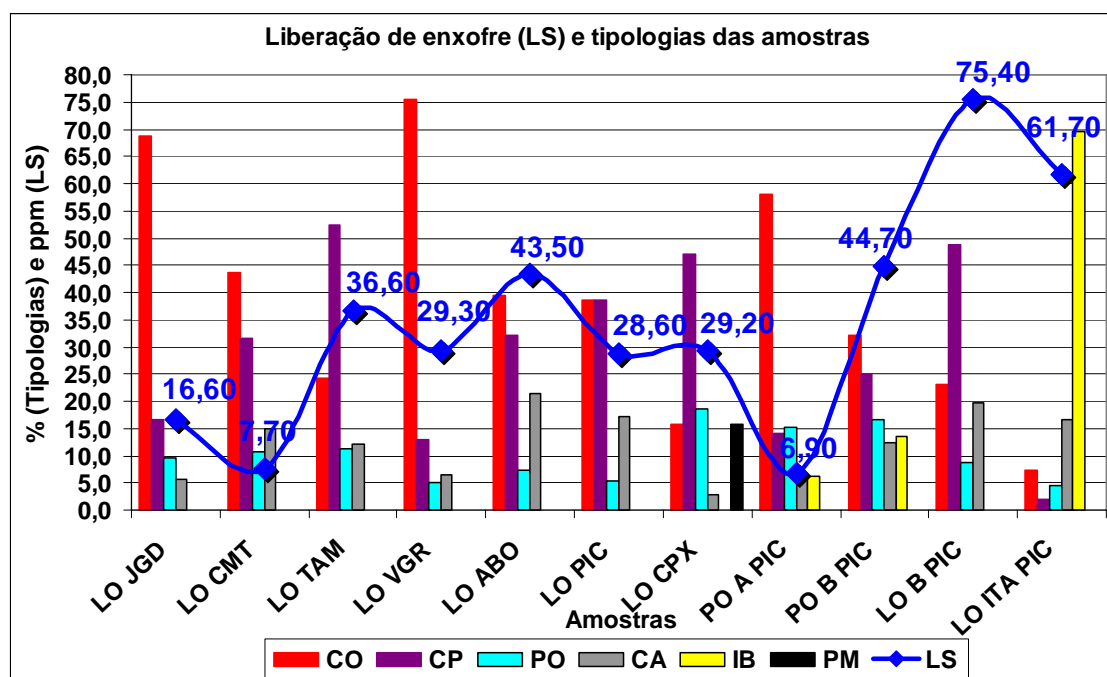


Figura 5.143 - Associação da liberação de enxofre com as principais tipologias.

CO: compacta; **CP:** compacta porosa; **PO:** porosa; **CA:** canga; **IB:** itabirito;

PM: proto-minério.

Em termos gerais a redutibilidade aumenta com o incremento das tipologias associadas à canga, tipologias porosas e itabiríticas. Minérios com percentuais mais elevados de materiais compactos e compactos porosos, têm maior dificuldade de remoção de oxigênio dos óxidos de ferro, pela menor porosidade e permeabilidade relativas, quando comparados aos minérios derivados de alteração (figura 5.144). As figuras 5.139 a

5.141 mostram, através das linhas de tendência, a elevação dos percentuais das tipologias associadas a graus mais elevados de alteração supergênica, no mesmo sentido do aumento dos índices de redutibilidade relativa. A tipologia denominada de proto-minério tende a um comportamento semelhante ao do material poroso e canga, pelo alto grau de alteração do minério contaminado por altos teores de alumina.

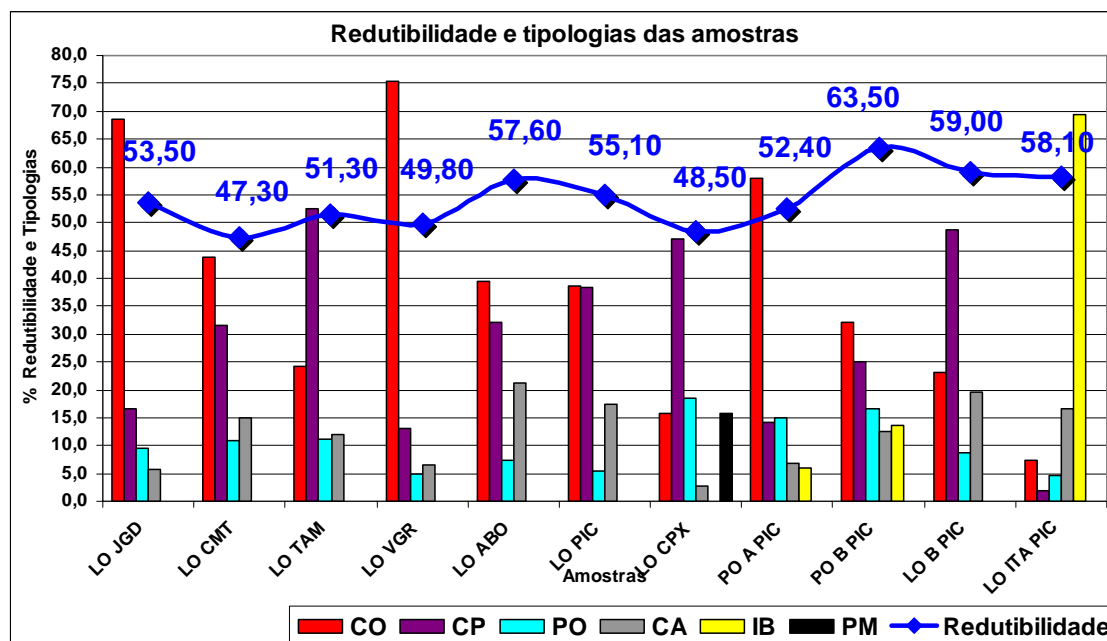


Figura 5.144 - Associação da redutibilidade com as principais tipologias.

CO: compacta; **CP:** compacta porosa; **PO:** porosa; **CA:** canga; **IB:** itabirito;

PM: proto-minério.

A avaliação da degradação durante a redução (RDI) condiciona os valores mais altos associados aos fragmentos mais frágeis que compõem um produto granulado de minério de ferro. O RDI varia no mesmo sentido da redutibilidade, mas valores mais elevados de RDI são prejudiciais ao processo siderúrgico de redução direta e alto-forno, enquanto redutibilidades mais elevadas são altamente benéficas. Pode ser afirmado que as tipologias que controlam os dois índices na direção dos valores mais elevados são as mesmas, sendo necessário encontrar um equilíbrio na mistura dos produtos granulados para compatibilizar parcialmente os dois índices metalúrgicos nos processos de redução direta e alto-forno (figura 5.145).

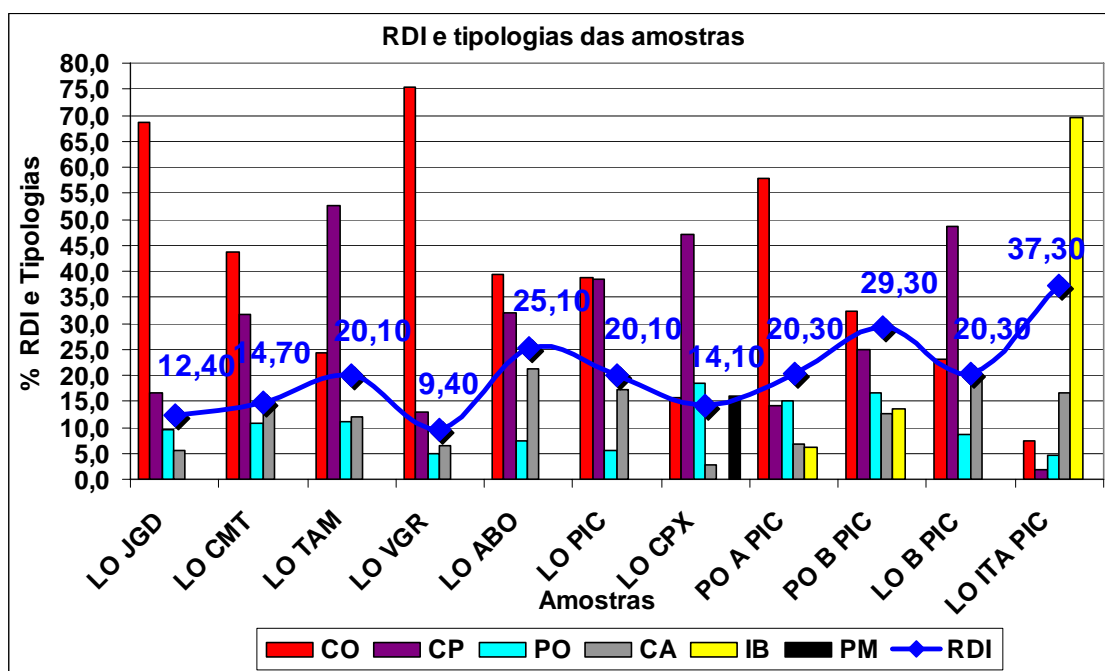


Figura 5.145 - Associação do RDI com as principais tipologias.

CO: compacta; CP: compacta porosa; PO: porosa; CA: canga; IB: itabirito; PM: proto-minério.

A tendência geral dos índices de crepitação é reduzir com o aumento dos percentuais das tipologias porosas, itabiríticas, associadas à canga e proto-minério (figuras 5.146 e 5.147). As tipologias naturalmente mais consistentes, principalmente as compactas e compacta porosas, quando submetidas a choque térmico durante os ensaios de crepitação, tem uma forte tendência a gerar finos, com conseqüente elevação dos índices de crepitação. As principais estruturas geológicas (planos de bandamento e foliação) das tipologias mais duras são mais consistentes, com menor grau de porosidade e permeabilidade e ao serem submetidas a um resfriamento brusco ocorre um alívio de pressão ao longo das estruturas de fraqueza e a conseqüente geração de material fino. Por outro lado, as tipologias porosas, itabiríticas, associadas à canga e proto-minério são menos estruturadas (planos de bandamento e foliação), exceto as itabiríticas e são naturalmente mais frágeis, com um nível de porosidade e permeabilidade mais elevado, em comparação aos materiais compactos e compactos porosos, portanto geram menor quantidade de finos quando submetidas a um resfriamento brusco.

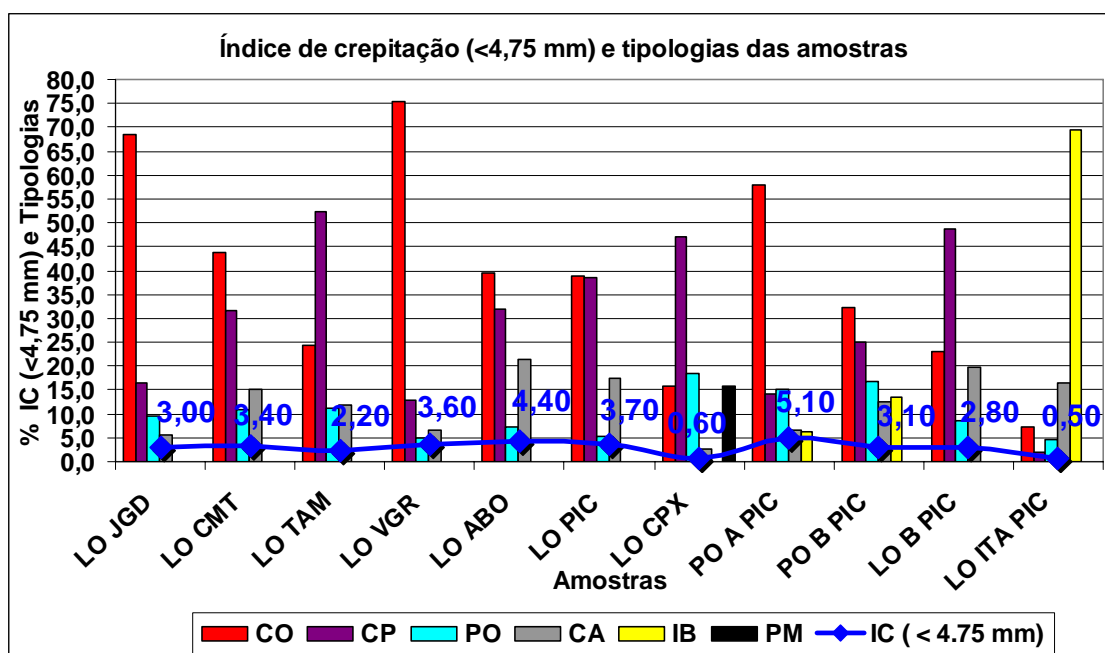


Figura 5.146 - Associação do índice de crepitação (fração <4,75 mm) com as principais tipologias.

CO: compacta; **CP:** compacta porosa; **PO:** porosa; **CA:** canga; **IB:** itabirito;

PM: proto-minério.

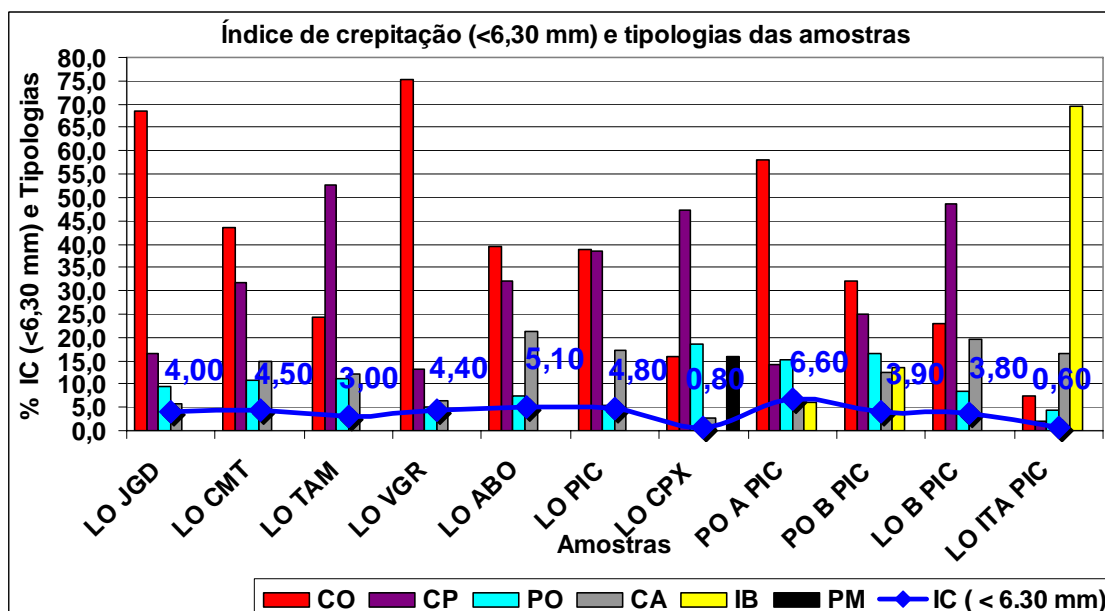


Figura 5.147 - Associação do índice de crepitação (fração <6,30 mm) com as principais tipologias. **CO:** compacta; **CP:** compacta porosa; **PO:** porosa; **CA:** canga; **IB:** itabirito;

PM: proto-minério.

Os índices de tamboramento mais elevados estão relacionados aos percentuais mais altos de tipologias compactas e, secundariamente, às tipologias compactas porosas (figuras 5.136, 5.137 e 5.148). A resistência mecânica dos fragmentos é o fator mais importante para percentuais mais elevados na fração >6,30 mm, após os ensaios padronizados de tamboramento. Valores mais baixos de de tamboramento estão relacionados a percentuais mais elevados das tipologias porosas, itabiríticas e associadas à canga, conforme indica a parte direita do gráfico da figura 5.6.50. A amostra LOABO, com baixo índice de tamboramento, apresenta percentuais médios de tipologias compactas e compactas porosas, mas o percentual de minério associado à canga foi decisivo para o baixo valor de TI. Na amostra LOITAPIC, o principal fator para o baixo valor de TI, foi o alto percentual da tipologia itabirítica, com baixa resistência ao manuseio, gerando finos.

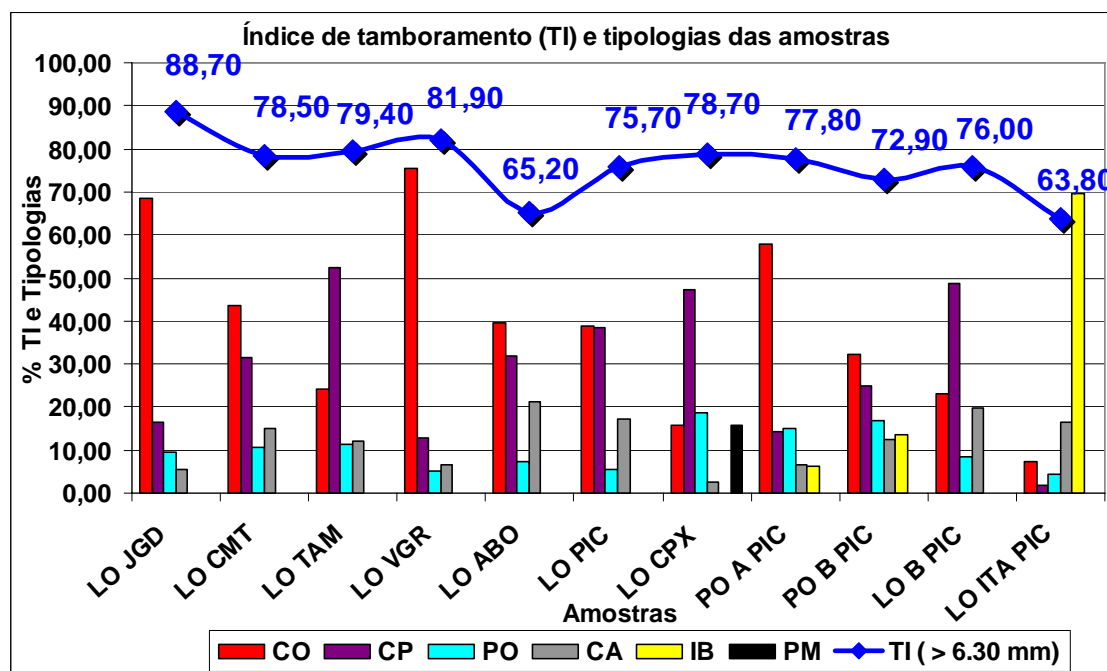


Figura 5.148 - Associação do índice de tamboramento (fração >6,30 mm) com as principais tipologias. **CO**: compacta; **CP**: compacta porosa; **PO**: porosa; **CA**: canga; **IB**: itabirito; **PM**: proto-minério.

Os índices de abrasão medem a quantidade de finos (<0,50 mm) gerada pelos mesmos ensaios de tamboramento, também dependentes das tipologias. Os valores mais elevados são atribuídos às amostras com percentuais mais altos de tipologias porosas,

itabiríticas e associadas à canga (figuras 5.139 a 5.142). A tipologia denominada de proto-minério tem um comportamento semelhante às partículas porosas. A presença maior de tipologias compactas e compactas porosas reduzem os índices de abrasão, pela menor geração de finos nos ensaios de tamboramento (figura 5.149). As amostras LOABO e LOITAPIC confirmam a baixa resistência mecânica enfatizada anteriormente, apresentando altos índices de abrasão.

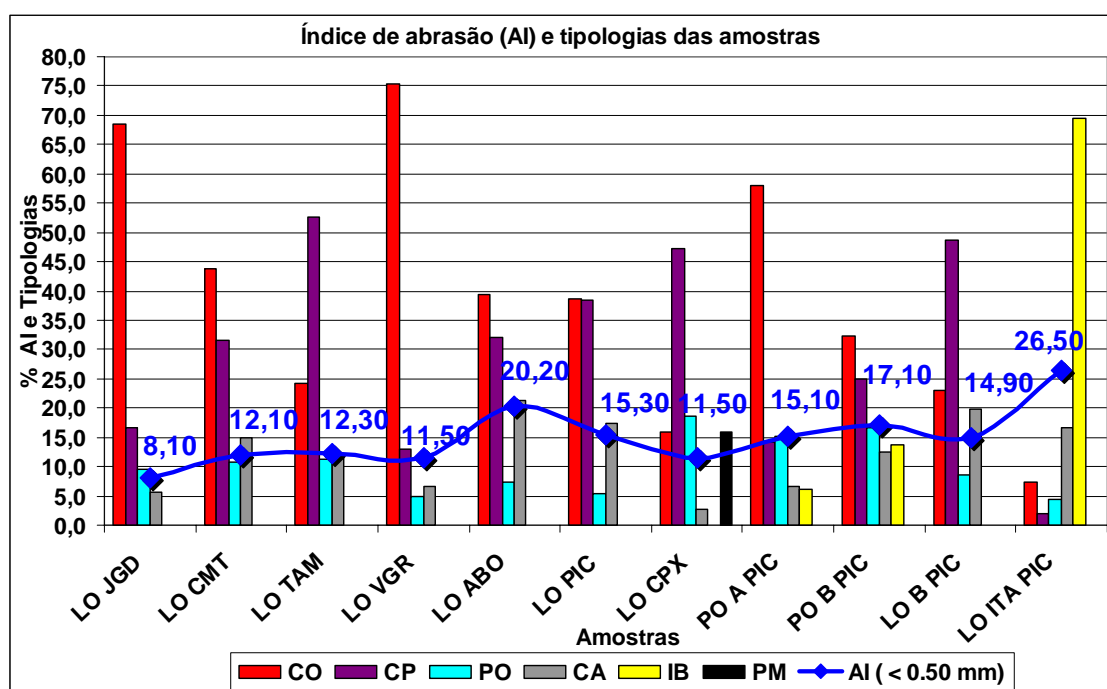


Figura 5.149 - Associação do índice de abrasão (fração <0,50 mm) com as principais tipologias. **CO**: compacta; **CP**: compacta porosa; **PO**: porosa; **CA**: canga; **IB**: itabirito; **PM**: proto-minério.

A tabela V.7 resume a influência relativa das tipologias nas variáveis metalúrgicas. As associações encontradas não devem ser interpretadas isoladamente, pois as variáveis químicas principais e as associações mineralógicas também têm fortes influências na caracterização metalúrgica dos produtos granulados de minério de ferro. As unidades tipológicas são características físicas dos minérios, determinadas com auxílio de lupa binocular, portanto não significam análises intrínsecas dos tipos de fragmentos e configuram um estágio primário de associação com os índices metalúrgicos e sempre devem ser feitos estudos de correlações mais detalhados.

Tabela V.7 – Resumo das influências da caracterização tipológica nas variáveis metalúrgicas de produtos granulados de minério de ferro.

Tipologia	Ensaio Metalúrgico								
	GM (%)	FG (< 3,35 mm)	LS	Redutibilidade	RDI	C (< 4.75 mm)	C (< 6.30 mm)	TI (> 6.30 mm)	AI (< 0.50 mm)
Compacta	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓
Compacta Porosa	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓
Porosa	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑
Canga	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑
Itabirito	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑
Proto-minério	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑

OBS: Correlação relativa entre as tipologias descritas e os índices metalúrgicos:

- O percentual da tipologia é diretamente proporcional aos valores do índice metalúrgico ↑
- O percentual da tipologia é inversamente proporcional aos valores do índice metalúrgico ↓

São correlacionados a seguir os principais minerais e a porosidade relativa, descritos pela microscopia ótica (hematita granular, hematita sinuosa, martita, hematita lamelar e goethita), com os índices metalúrgicos. Para facilitar as interpretações, os gráficos dos índices metalúrgicos estão ordenados em ordem crescente. As amostras com os percentuais mineralógicos e a porosidade relativa, estão ordenados nos gráficos na mesma seqüência dos índices metalúrgicos.

Os valores do grau de metalização variam de 87,70 a 95,70 nas 11 amostras estudadas (figura 5.150). Na figura 5.151 encontram-se sumariadas as médias ponderadas pelo percentual de cada tipologia de todos os minerais descritos ao microscópio ótico, sendo as amostras dos produtos granulados ordenadas da mesma forma que os índices de metalização. Há um amplo predomínio do percentual do mineral hematita granular (alto grau de cristalização, faces bem definidas, baixo grau de impurezas, ausência de martitização, tendo sido recristalizado em graus metamórficos mais elevados, portanto em temperaturas mais altas), com valores médios diretamente proporcionais ao aumento do grau de metalização, conforme coeficiente de correlação (valor de 0,7904) da linha de tendência da figura 5.152. O mineral hematita sinuosa acompanha hematita granular, sendo a linha de tendência diretamente proporcional (valor do coeficiente de correlação de 0,5293) ao aumento do grau de metalização. Este mineral representa o estágio final da martitização, recristalizado a temperaturas médias, com faces irregulares e com variações maiores nos percentuais. A amostra de LOCMT é anômala neste mineral, com

percentual de 31,84 %, coincidente com o grau de metalização mais elevado (figura 5.153).

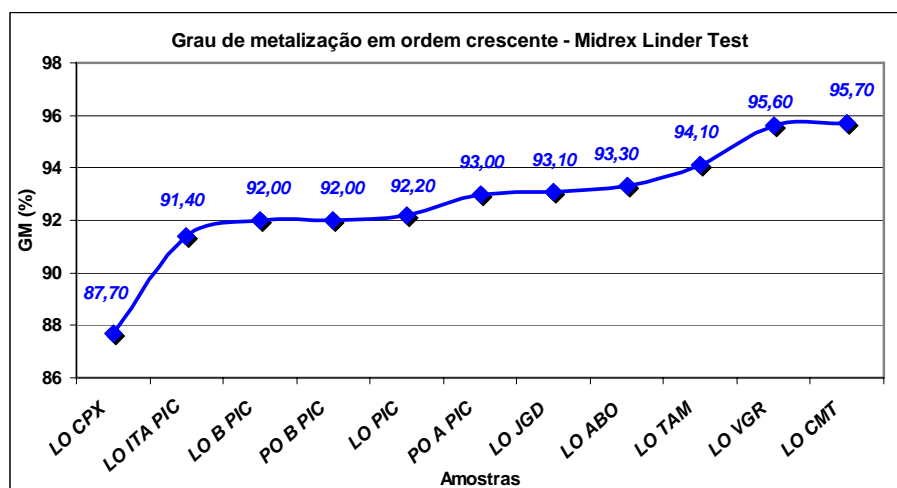


Figura 5.150 – Grau de metalização (Midrex Linder Test) ordenado de forma crescente.

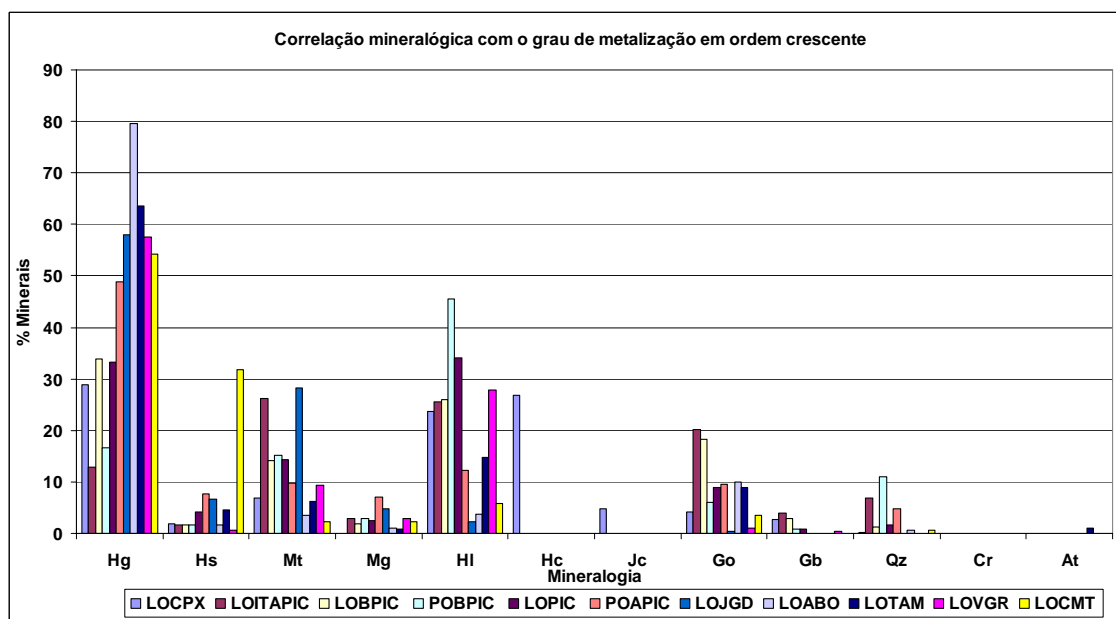


Figura 5.151 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente do grau de metalização, conforme figura anterior.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar; **Hc:** hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

A martita, a hematita lamelar e a goethita, são inversamente proporcionais ao grau de metalização, com coeficientes de correlação negativos, relacionados às linhas de tendências (valores de -0,4370, -0,5069 e -0,5095). A goethita é um mineral de alteração, apresentando uma microestrutura complexa, provavelmente associada a uma dificuldade maior de metalização, dificultando a ação do gás redutor. A martita também apresenta uma estrutura de transição, a partir da magnetita. A hematita lamelar apresenta formato alongado, provavelmente dificultando também a ação do gás redutor (figuras 5.154, 5.155 e 5.156).

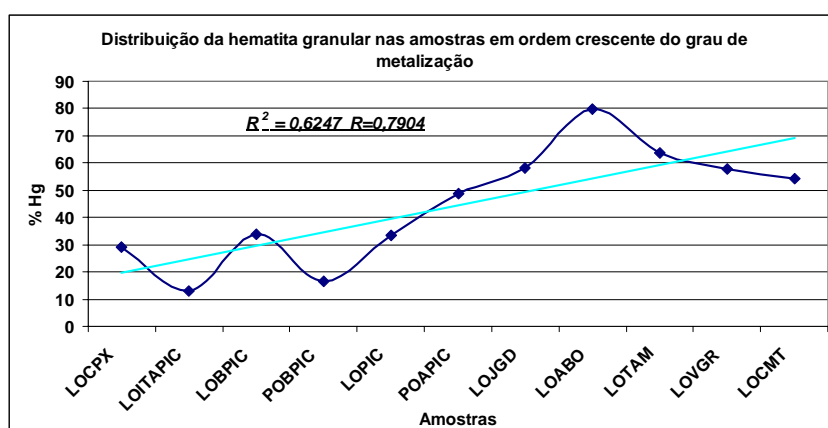


Figura 5.152 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

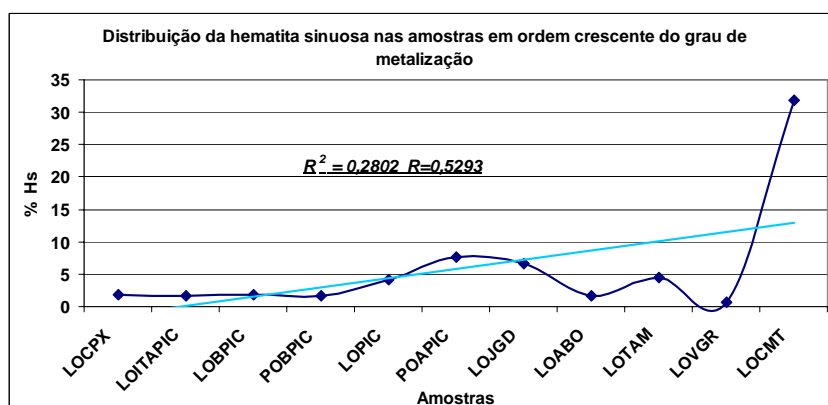


Figura 5.153 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Embora o coeficiente de correlação da linha de tendência seja baixo (valor de -0,1836) e com alta variabilidade, a porosidade relativa é inversamente proporcional à metalização. A hipótese mais provável que o aumento de poros torna os fragmentos de minério muito heterogêneos, dificultando a ação dos gases redutores, no processo de redução direta (figura 5.157). O mineral goethita está associado à unidade tipológica canga, portanto com níveis elevados de porosidade e também com o maior tamanho médio dos poros, atuando de forma inversamente proporcional ao grau de metalização.

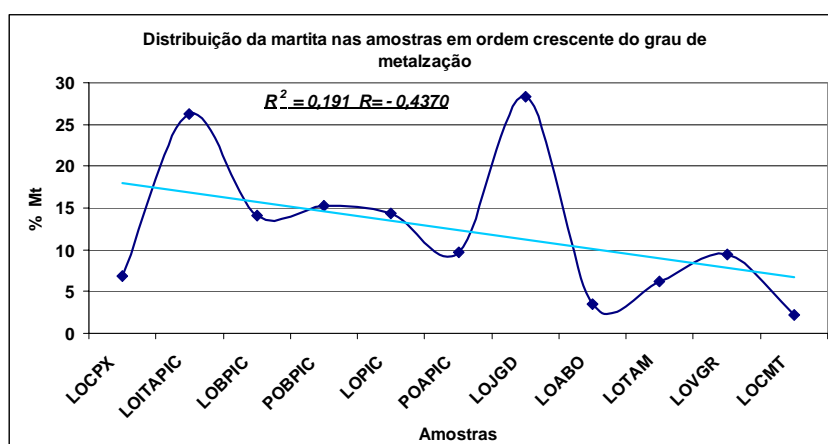


Figura 5.154 – Distribuição de martita nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

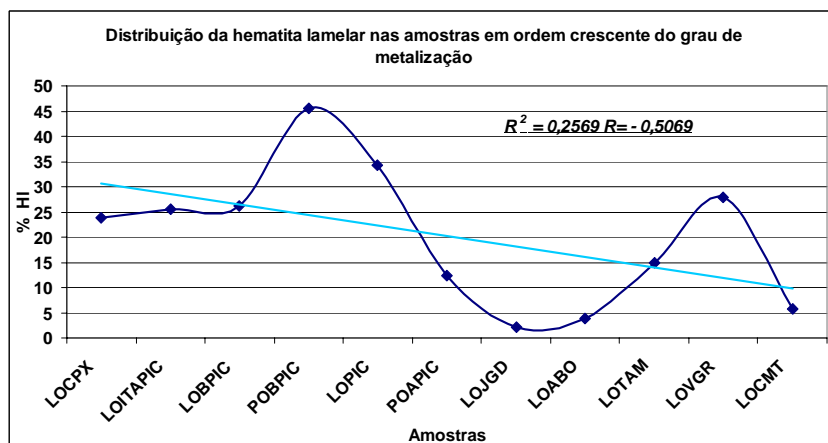


Figura 5.155 – Distribuição de hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

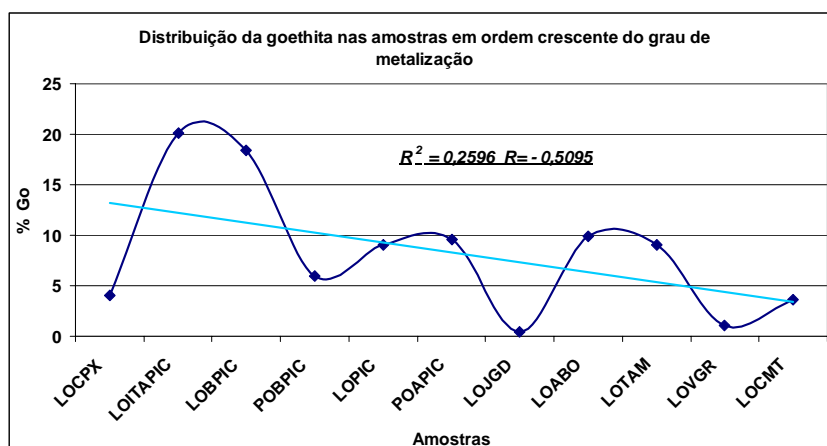


Figura 5.156 – Distribuição de goethita nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

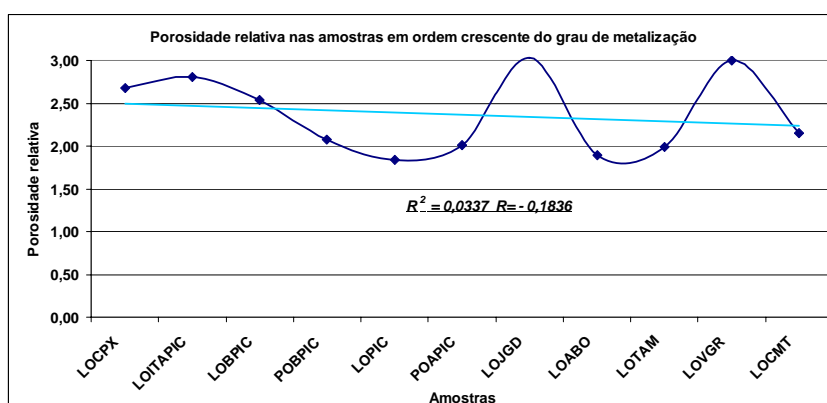


Figura 5.157 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente ao grau de metalização, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

Os finos gerados no processo de redução direta estão ordenados de forma crescente, variando de 4,10 a 13,50 % (figura 5.158). A figura 5.159 sumaria a distribuição mineralógica ponderada das amostras na mesma seqüência dos finos gerados. A hematita granular e sinuosa tem o mesmo comportamento, com percentuais inversamente proporcionais aos finos gerados, com base na linha de tendência (valores de -0,3059 e -0,5052, respectivamente). Quanto menor o percentual de hematita granular e sinuosa, maior a geração de finos no processo de redução direta (figuras 5.160 e 5.161). A resistência desses minerais é maior, no processo de redução direta.

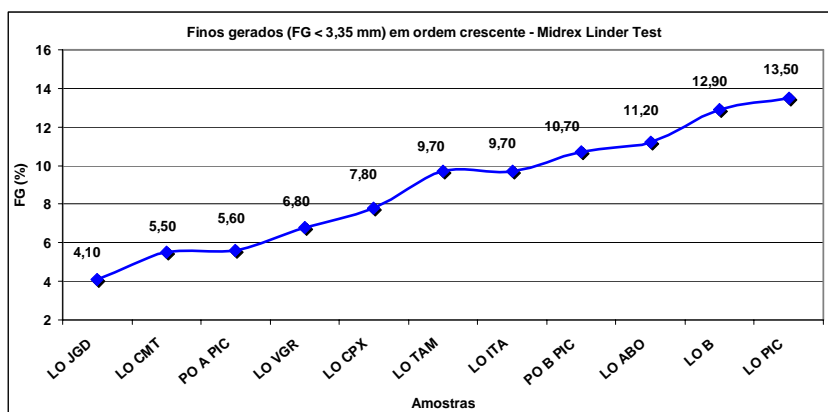


Figura 5.158 – Finos gerados (Midrex Linder Test) ordenados de forma crescente.

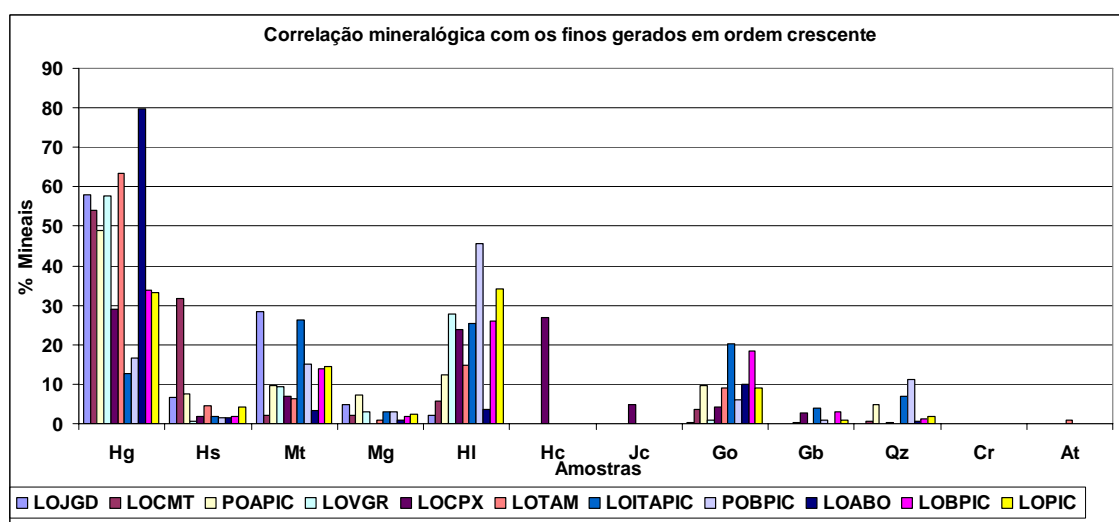


Figura 5.159 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente dos finos gerados (Midrex Linder Test).

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar; **Hc:** hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

A distribuição do mineral martita mostrou alta variabilidade nas amostras ordenadas segundo o aumento dos finos gerados e a correlação foi pouco significativa (figura 5.162), com base na linha de tendência (valor de -0,0361).

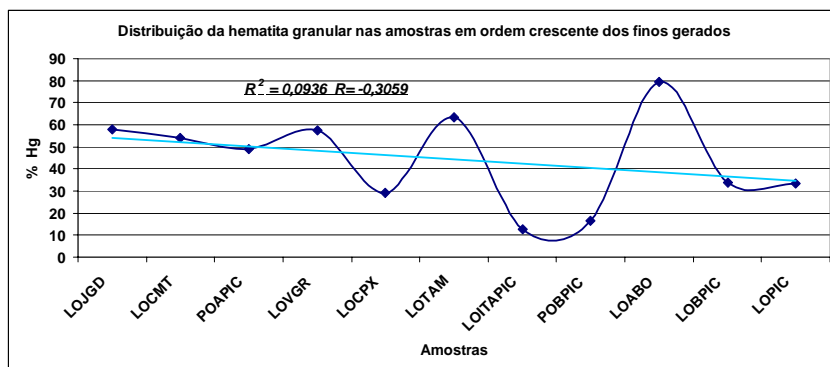


Figura 5.160 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

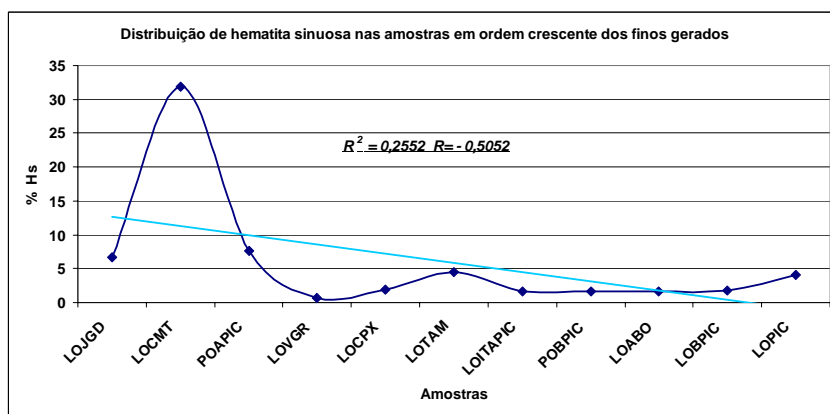


Figura 5.161 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

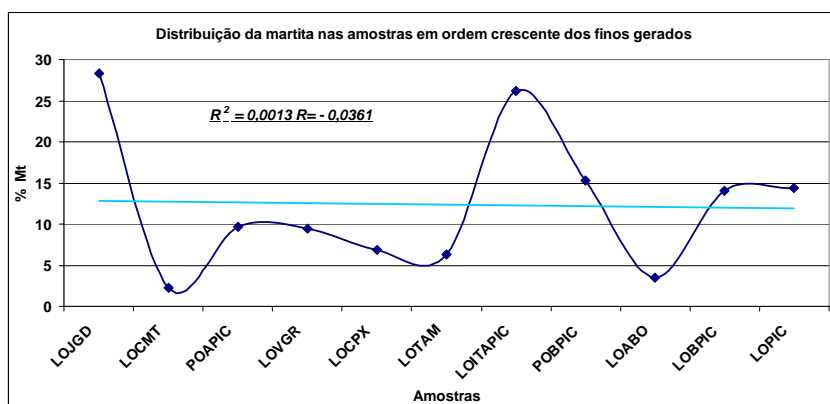


Figura 5.162 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Os minerais hematita lamelar e goethita apresentaram uma forte correlação diretamente proporcional, com base na linha de tendência (valores de 0,5566 e 0,6091, respectivamente). Os valores demonstram que os minérios granulados destinados para redução direta, com percentuais mais elevados desses minerais, apresentam uma forte tendência de gerar mais finos. A hematita lamelar, pelo formato mais alongado, torna-se mais frágil e a goethita é um mineral de alteração, conseqüentemente com uma maior possibilidade de gerar finos no processo (figuras 5.163 e 5.164).

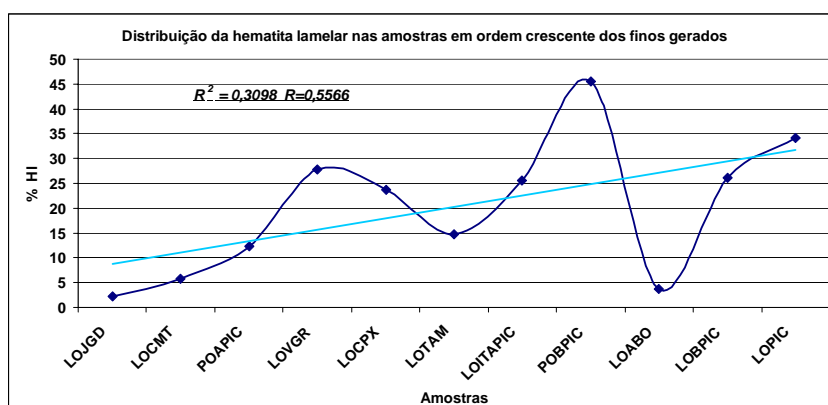


Figura 5.163 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

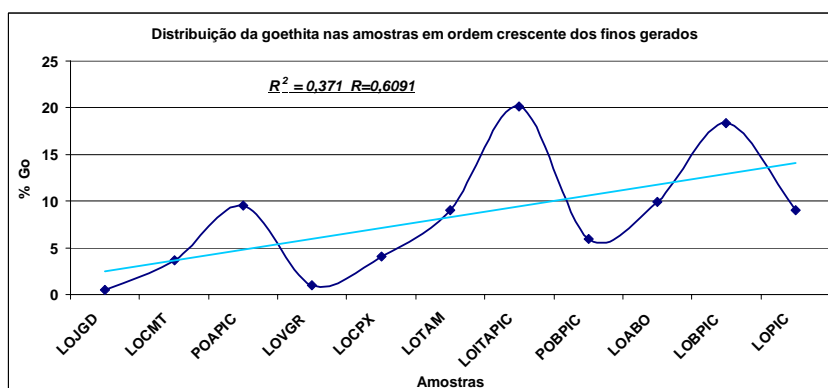


Figura 5.164 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

A porosidade relativa é inversamente proporcional aos finos gerados, com base na correlação da linha de tendência (valor de -0,4243). Em termos práticos, minérios

granulados com porosidade menor geram mais finos no processo de redução direta e vice-versa (figura 5.165). A porosidade permite uma percolação maior do gás redutor, gerando menor quantidade de finos.

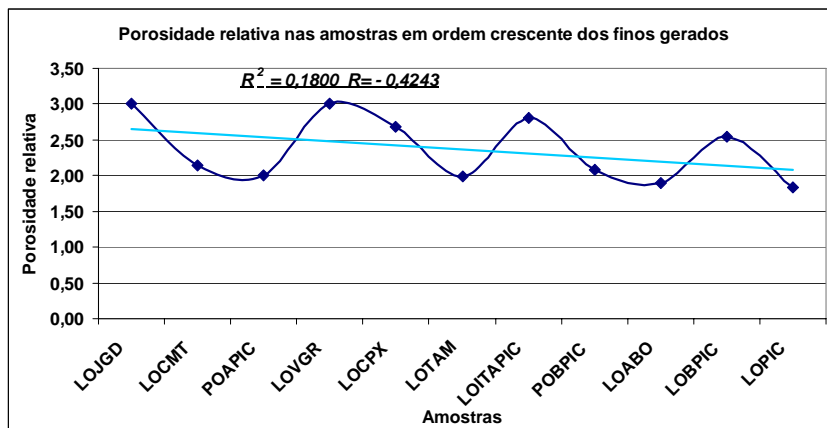


Figura 5.165 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos finos gerados, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

A liberação de enxofre está ordenada de forma crescente, com uma ampla variação dos valores (6,90 a 75,40 ppm), como mostra a figura 5.166.

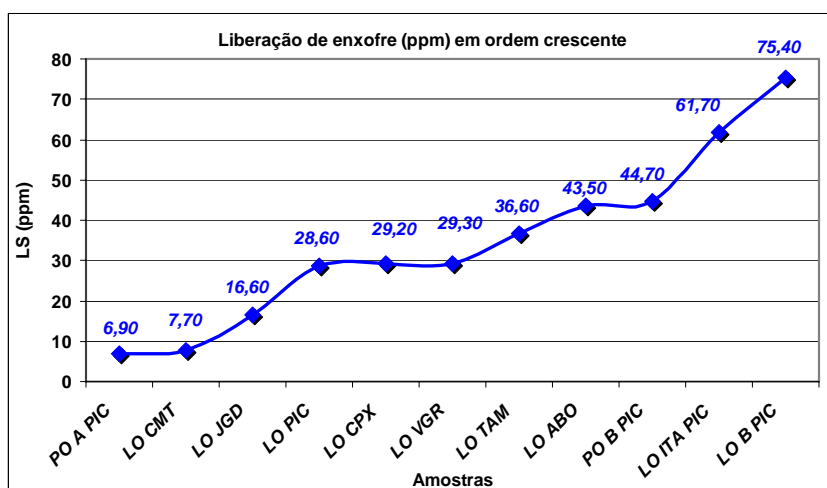


Figura 5.166 – Liberação de enxofre em ppm, ordenados de forma crescente.

Na figura 5.167 encontra-se sumariada a distribuição mineralógica das amostras ordenadas na mesma seqüência crescente de liberação de enxofre. Os minerais hematita granular e sinuosa apresentam um comportamento inversamente proporcional (valores de -0,3447 e -0,5653, respectivamente) à liberação de enxofre, denotando um baixo percentual de elementos contaminantes desses minerais, associados a eventos genéticos anteriores às fases de alteração supergênica (figuras 5.168 e 5.169).

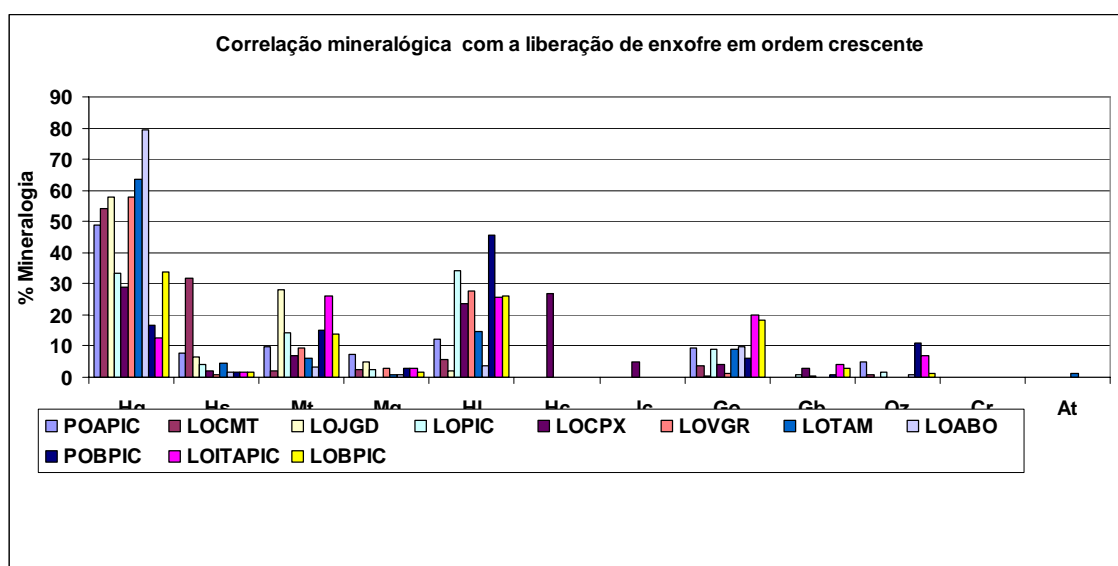


Figura 5.167 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente da liberação de enxofre.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **Hl:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Je:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

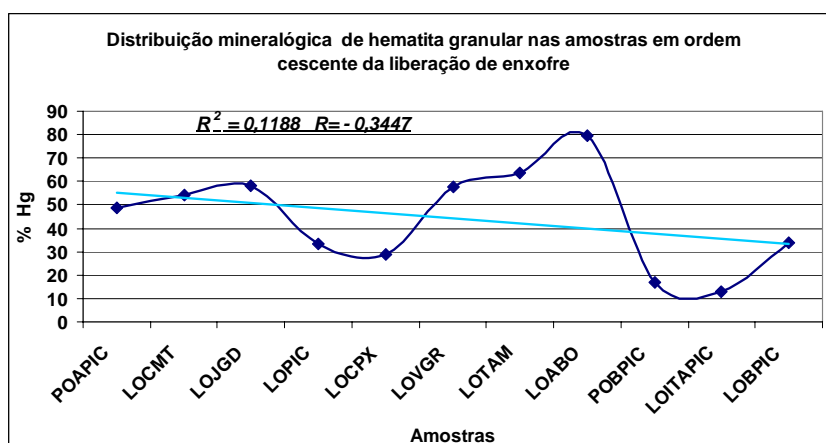


Figura 5.168 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

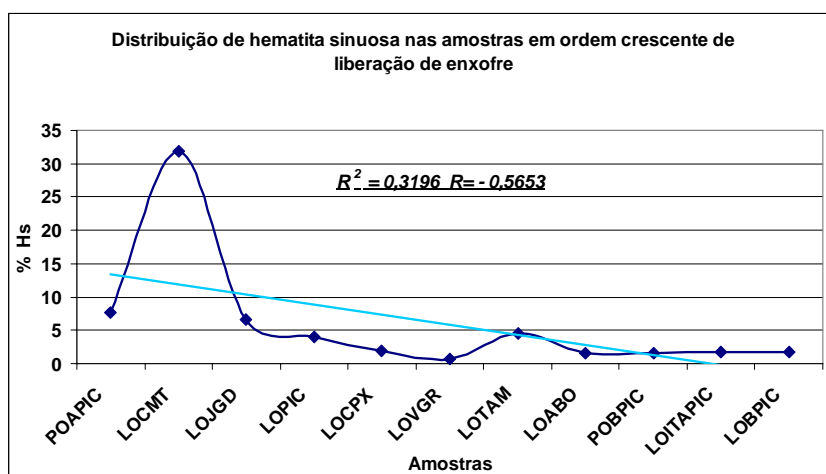


Figura 5.169 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Os minerais martita, hematita lamelar e goethita apresentam o mesmo comportamento diretamente proporcional à liberação de enxofre, com base no coeficiente de correlação extraído da linha de tendência (valores de 0,1982, 0,4586 e 0,6314, respectivamente). O mineral goethita, sendo originado por alteração, comumente associado à canga, apresenta a correlação mais elevado, pois os valores de liberação de enxofre mais elevados estão associados aos minérios granulados mais alterados (figuras 5.170, 5.171 e 5.172).

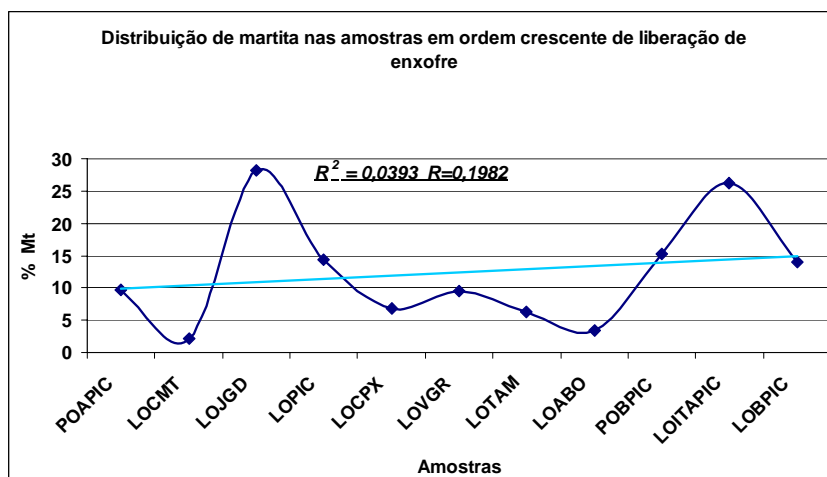


Figura 5.170 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

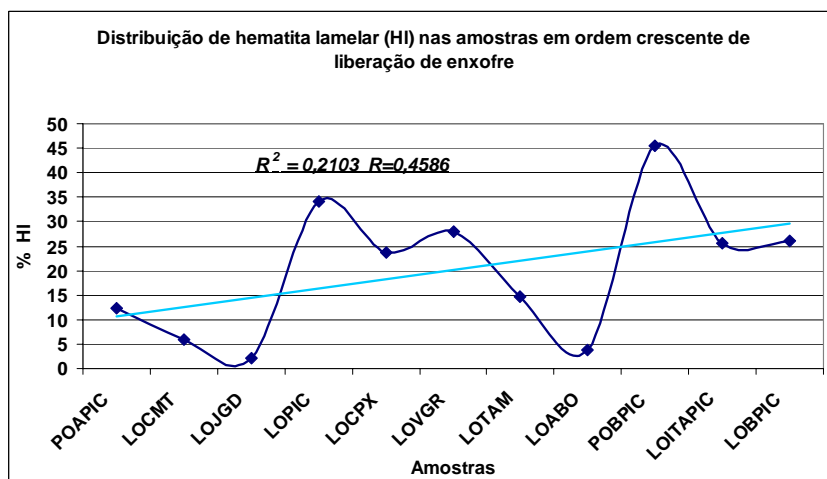


Figura 5.171 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

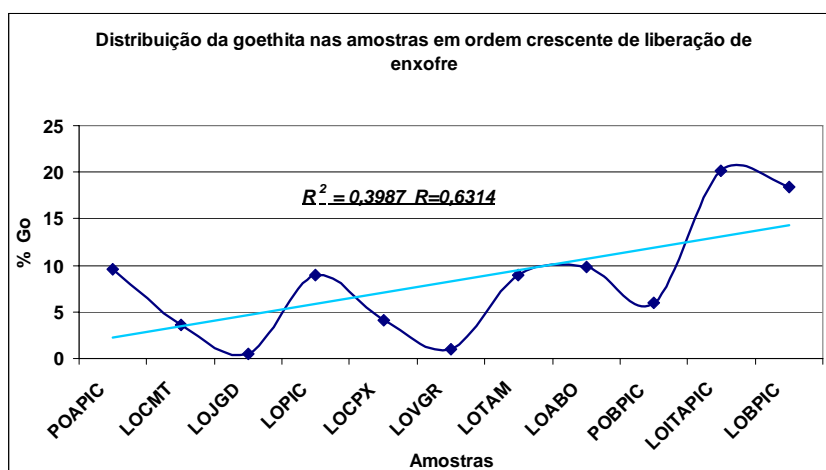


Figura 5.172 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

A porosidade relativa é diretamente proporcional à liberação de enxofre, com base na correlação derivada da linha de tendência (valor de 0,1435). Esta associação é derivada da mesma correlação do mineral goethita, predominante na tipologia canga. Além de percentuais mais elevados de poros, o tamanho médio dos mesmos é maior (figura 5.173).

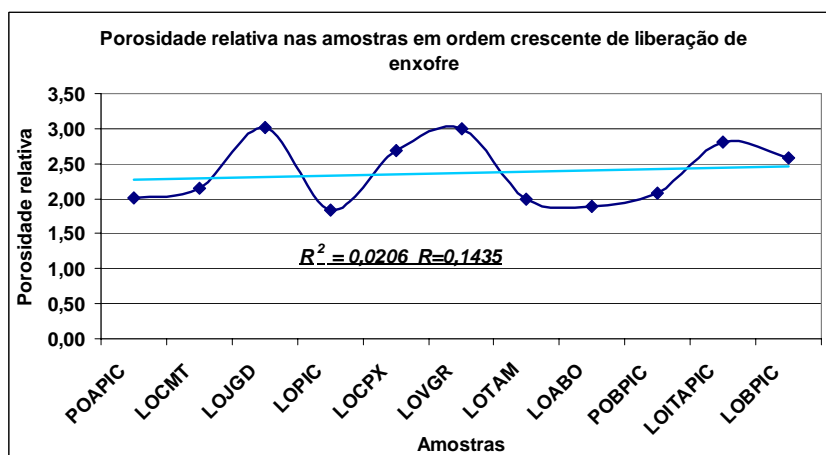


Figura 5.173 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente à liberação de enxofre, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

Os resultados dos índices de redutibilidade variam de 47,30 a 65,50 %, nas amostras de produtos granulados de minério de ferro (figura 5.174).

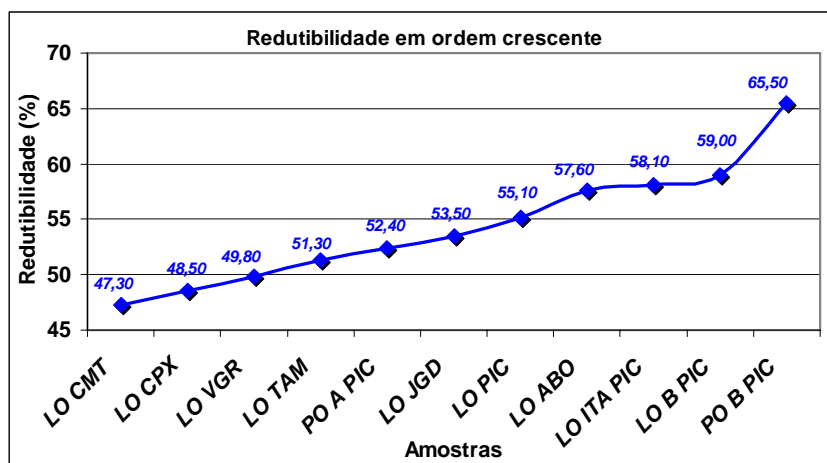


Figura 5.174 – Valores de redutibilidade, ordenados de forma crescente.

A distribuição mineralógica está representada na figura 5.175, sendo as amostras também ordenadas segundo os valores crescentes de redutibilidade. O comportamento dos minerais hematita granular e sinuosa é muito similar, inversamente proporcionais aos índices de redutibilidade, com base nos coeficientes de correlações das linhas de tendências (valores de -0,4150 e -0,5336). Quanto maior os percentuais desses minerais, maior dificuldade de perda de oxigênio para o gás redutor (figuras 5.176 e 5.177).

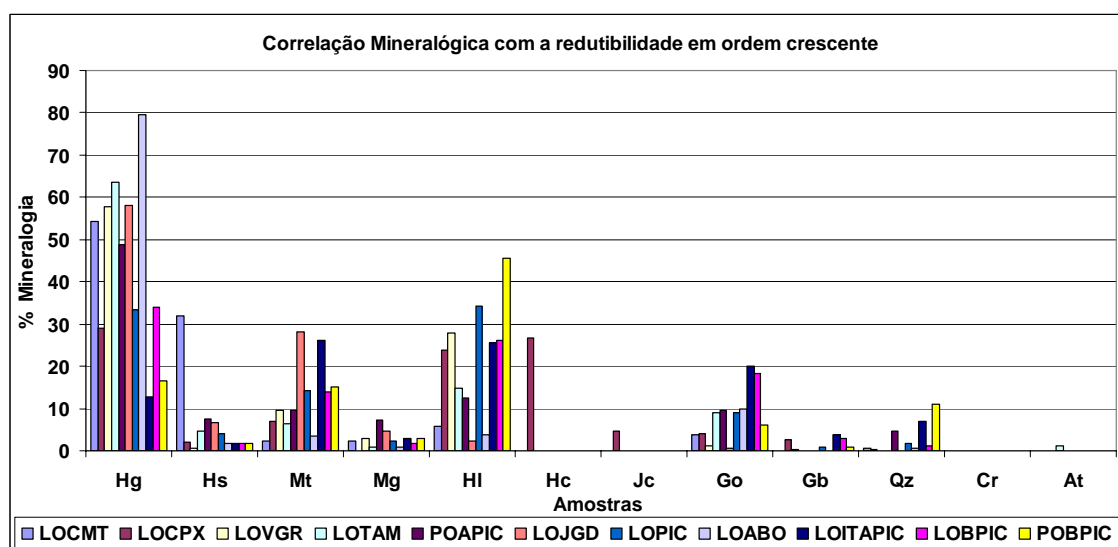


Figura 5.175 – Distribuição mineralógica media das amostras ordenadas de forma crescente de redutibilidade.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **Hl:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:**
carbonato; **At:** agregado terroso.

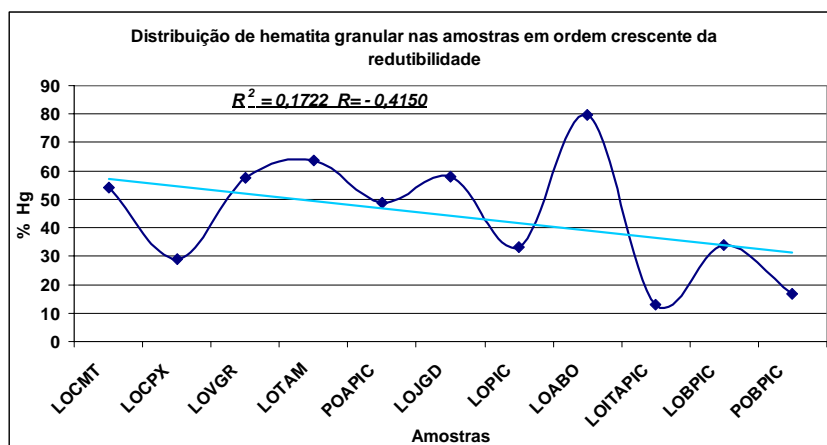


Figura 5.176 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Os minerais hematita granular e sinuosa, pelo grau de cristalização elevado, faces bem formadas, baixo nível de alteração, menor porosidade e tamanhos menores dos poros, são as prováveis causas de apresentarem maior dificuldade de perda de oxigênio para o gás redutor.

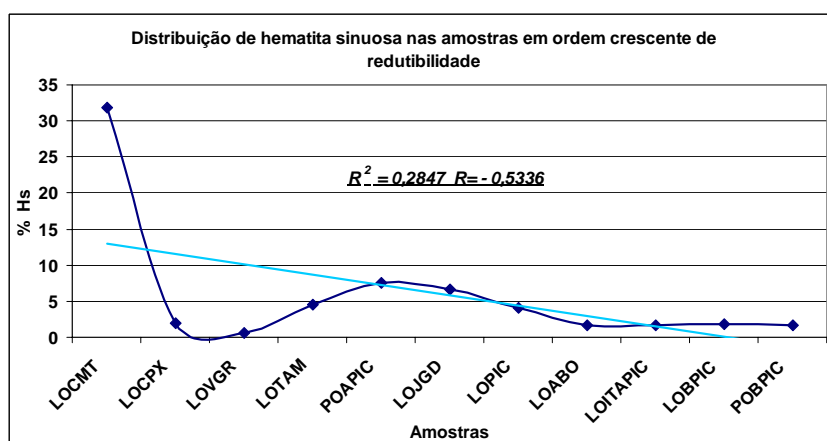


Figura 5.177 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Os minerais martita, hematita lamelar e goethita, apresentam um comportamento inverso ao da hematita granular e sinuosa, com variação diretamente proporcional aos índices de redutibilidade, conforme linhas de tendências e respectivos coeficientes de correlações (valores de 0,5059, 0,4428 e 0,6033, respectivamente). São minerais com níveis mais altos de alteração, estruturas micro cristalinas mais frágeis, sendo mais susceptíveis à ação do gás redutor (figuras 5.178, 5.179 e 5.180). O hábito alongado e delgado da hematita lamelar, seria a principal característica desse mineral para a ação mais eficiente do gás redutor.

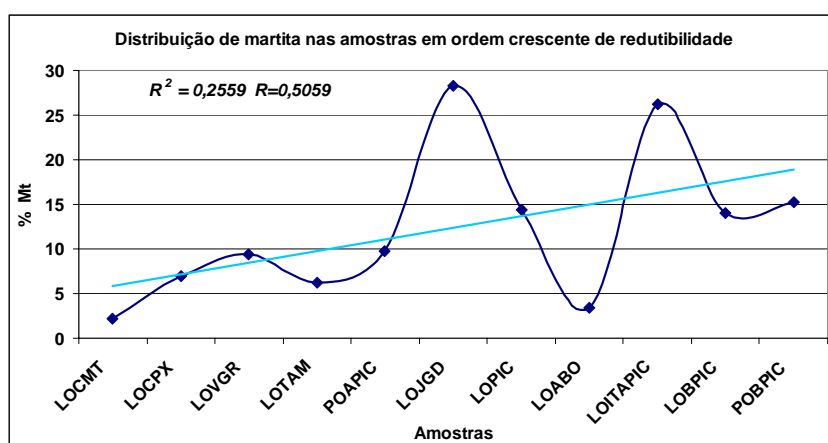


Figura 5.178 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

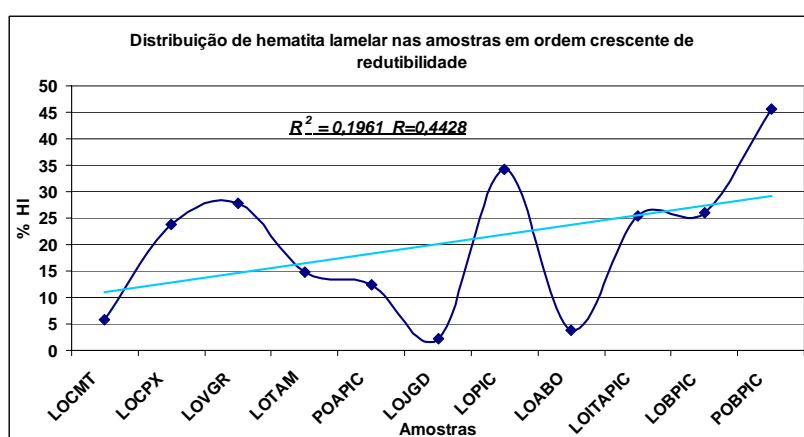


Figura 5.179 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

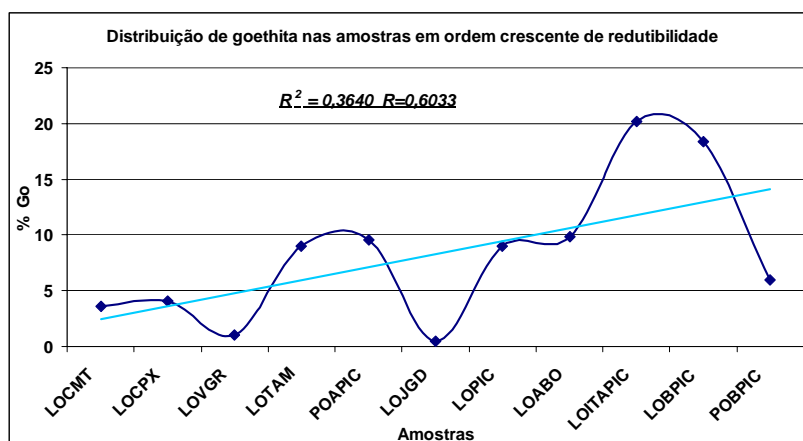


Figura 5.180 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Não foi obtida uma boa correlação na porosidade relativa das amostras, com uma linha de tendência inversamente proporcional e coeficiente de correlação correspondente negativo (valor de -0,1095). Esta constatação pode ser interpretada como se a porosidade intrínseca dos minerais seria mais importante que os espaços vazios entre os minerais (figura 5.181). Esta hipótese seria parcialmente confirmada pelas correlações positivas da martita, hematita lamelar e goethita.

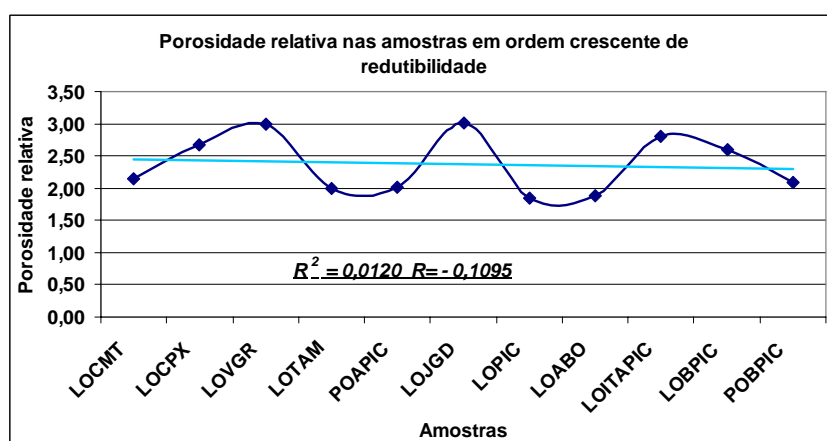


Figura 5.181 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de redutibilidade, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

O índice de degradação sob redução (RDI) varia de 9,40 a 37,30 %, ordenado de forma crescente nas 11 amostras objeto de estudo (figura 5.182).

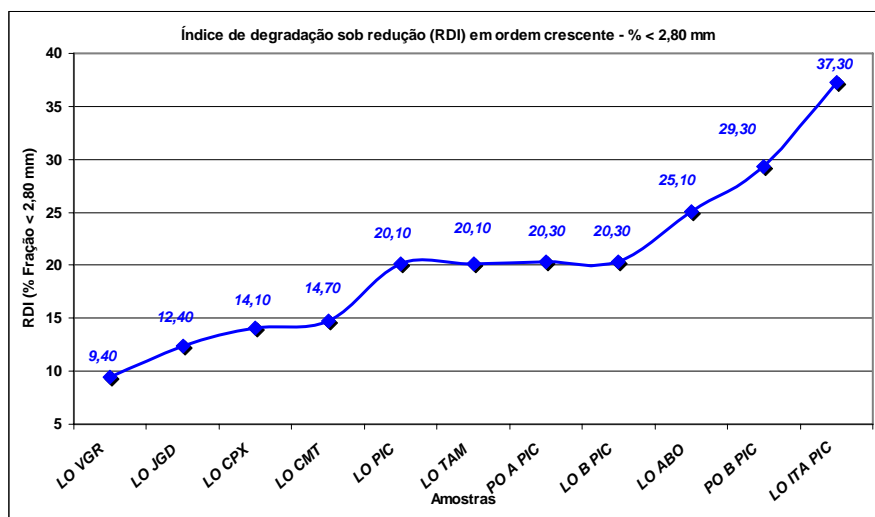


Figura 5.182 – Valores de RDI ordenados de forma crescente.

A distribuição mineralógica encontra-se sumariada na figura 5.183, na mesma ordem dos índices de RDI. Os minerais hematita granular e sinuosa variam inversamente ao aumento dos índices de RDI, conforme linhas de tendências e coeficientes de correlações associados (valores de -0,3813 e -0,2450, respectivamente). Como são minerais pouco alterados, são mais resistentes na geração de finos, no processo de redução (figuras 5.184 e 5.185).

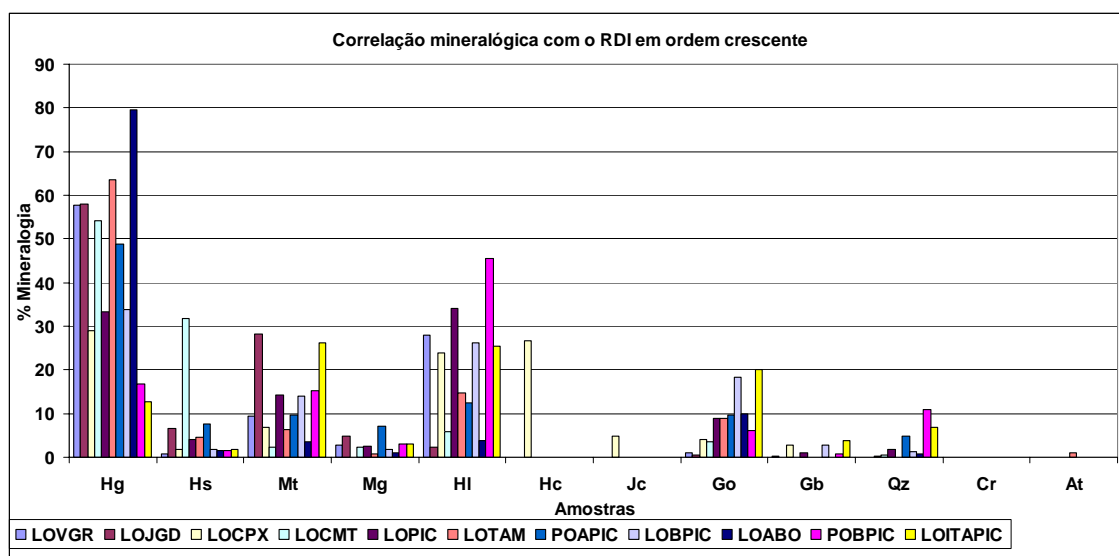


Figura 5.183 – Distribuição mineralógica media das amostras ordenadas em ordem crescente de RDI.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar; **Hc:** hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

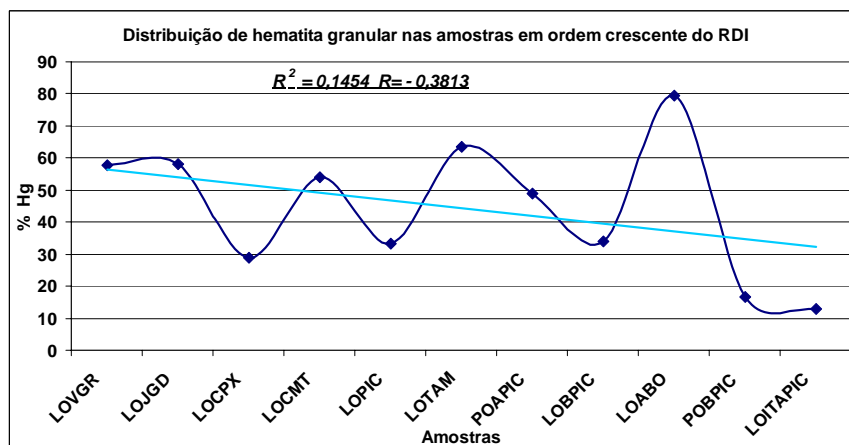


Figura 5.184 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

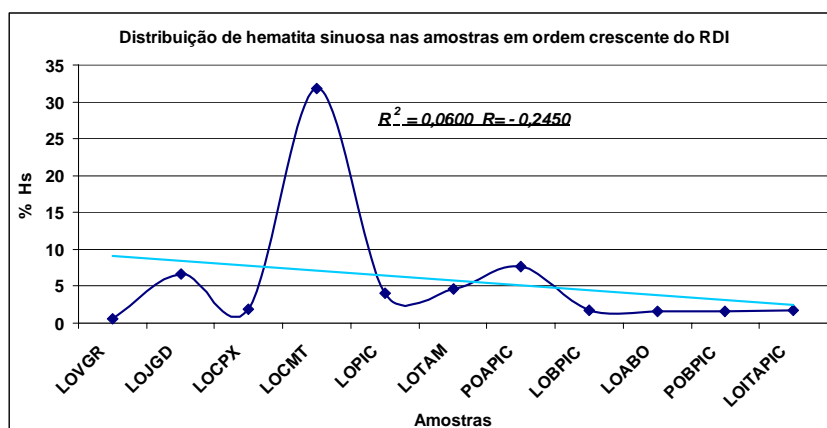


Figura 5.185 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Os minerais martita, hematita lamelar e goethita, apresentam uma variação diretamente proporcional aos percentuais de RDI, salientada nas linhas de tendências e coeficientes de correlações (valores de 0,1425, 0,2625 e 0,7813, respectivamente). São minerais frágeis, com graus de alteração mais elevados, principalmente a goethita, quando comparados à hematita granular e lamelar (figuras 5.186, 5.187 e 5.188).

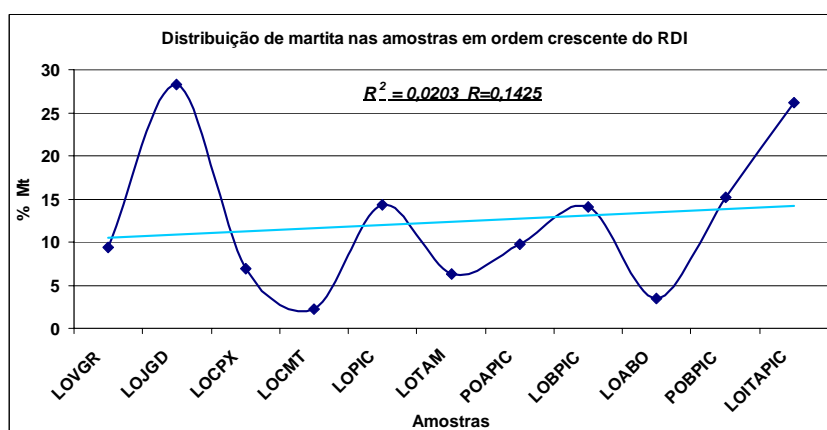


Figura 5.186 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

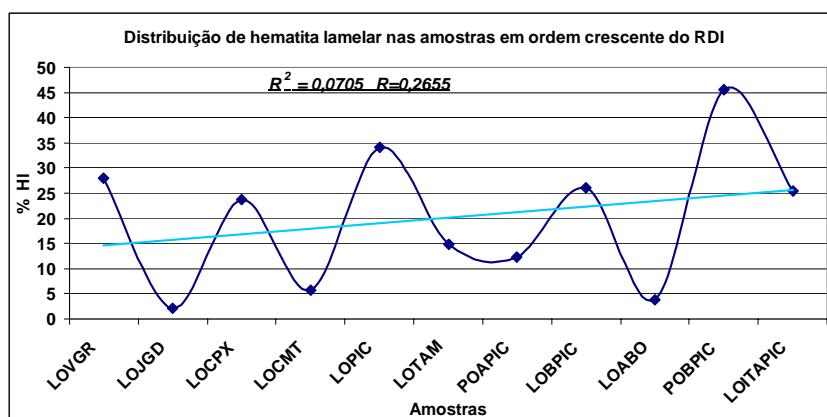


Figura 5.187 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

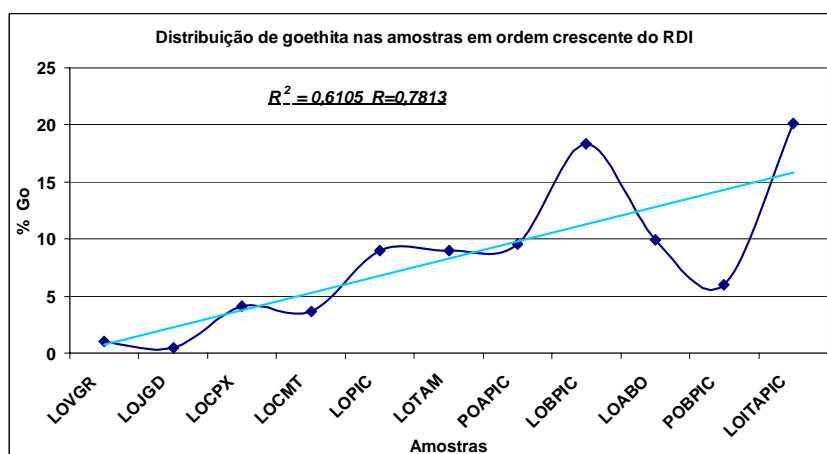


Figura 5.188 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

A porosidade relativa varia inversamente proporcional aos índices de degradação sob redução (RDI), salientada pela linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação (valor de -0,3977). Quanto menor a porosidade, maior a energia do gás redutor para percolar e promover a redução, com conseqüente aumento de finos (figura 5.189).

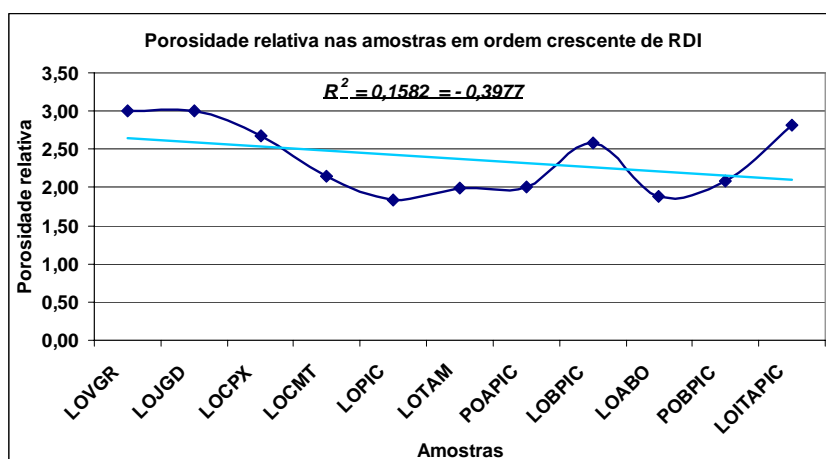


Figura 5.189 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de degradação sob redução (RDI), com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

Os índices de crepitação em ordem crescente nas frações <6,30 mm e <4,75 mm encontram-se detalhadas nas figuras 5.190 e 5.191. As curvas e os valores dos índices são semelhantes nas duas frações granulométricas, variando de 0,60 a 6,60 % na fração <6,30 mm e 0,50 a 5,10 % na fração <4,75 mm.

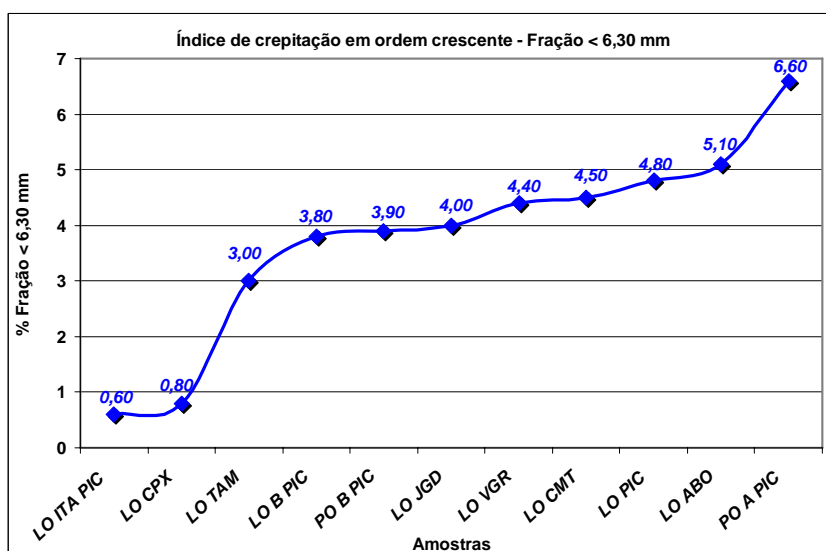


Figura 5.190 – Valores dos índices de crepitação na fração <6,30 mm, ordenados de forma crescente.

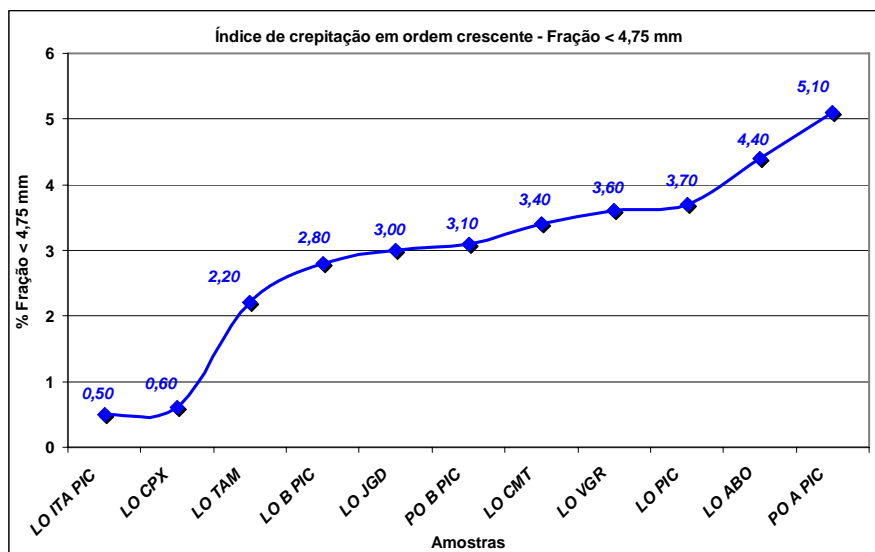


Figura 5.191 – Valores dos índices de crepitação na fração <4,75 mm, ordenados de forma crescente.

A distribuição mineralógica consta nas figuras 5.192 e 5.193, sendo as amostras seqüenciadas da mesma forma que nos índices de crepitação e apresentando uma grande similaridade nas duas distribuições, embora os ensaios tenham sido efetuados em granulometrias diferentes.

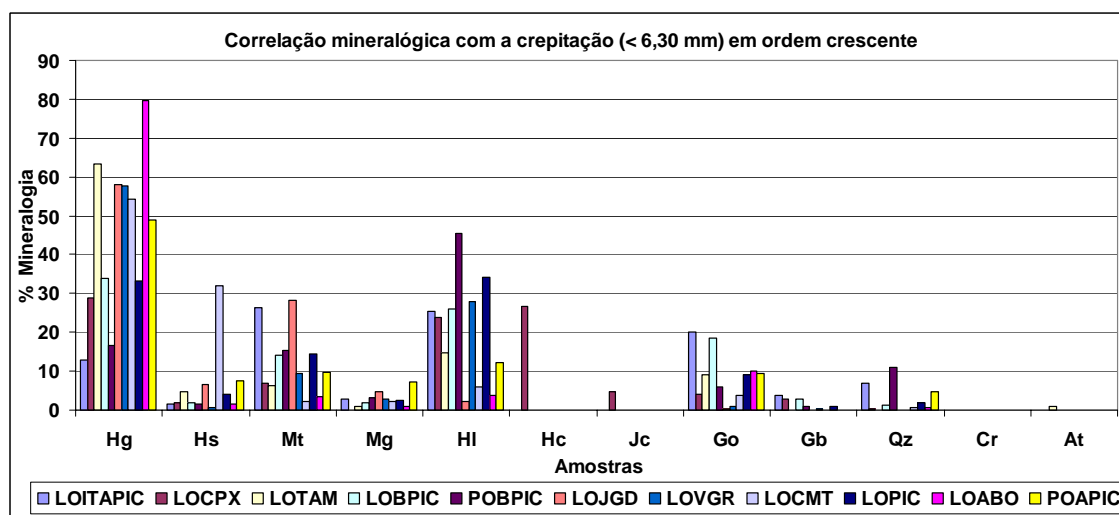


Figura 5.192 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente de crepitação (fração <6,30 mm).

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:**
carbonato; **At:** agregado terroso.

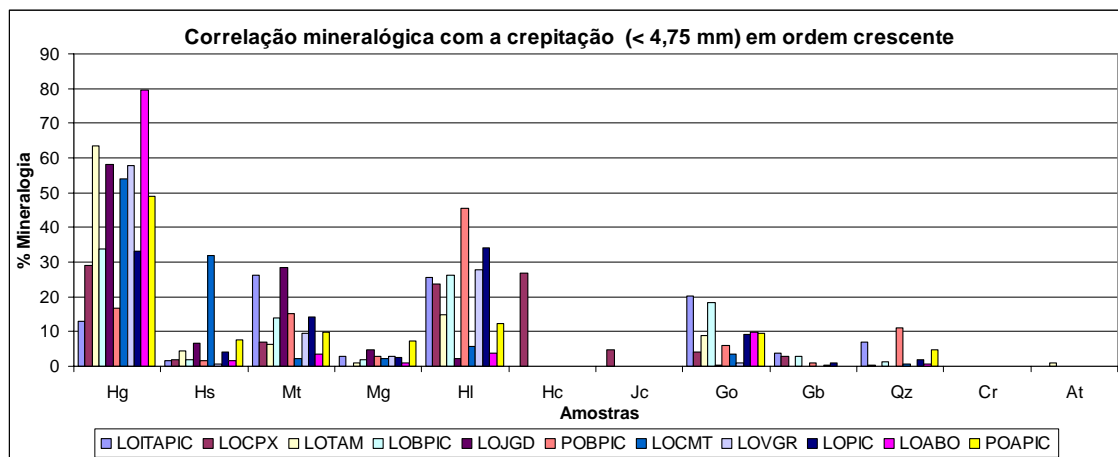


Figura 5.193 – Distribuição mineralógica media das amostras ordenadas em ordem crescente de crepitação (fração <4,75 mm).

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:**
carbonato; **At:** agregado terroso.

As distribuições de hematitas granulares se apresentam muito similares nos dois conjuntos de ensaios, sendo diretamente proporcionais às crepitações, com linhas de tendências semelhantes, bem como os fatores de correlações (valor de 0,5425 na fração <6,30 mm e 0,4877 na fração <4,75 mm). As figuras 5.194 e 5.195 representam a distribuição do mineral hematita granular. Quanto maior o percentual de hematita granular, maior os valores de crepitação, pela baixa porosidade intrínseca do mineral e baixo nível de alteração.

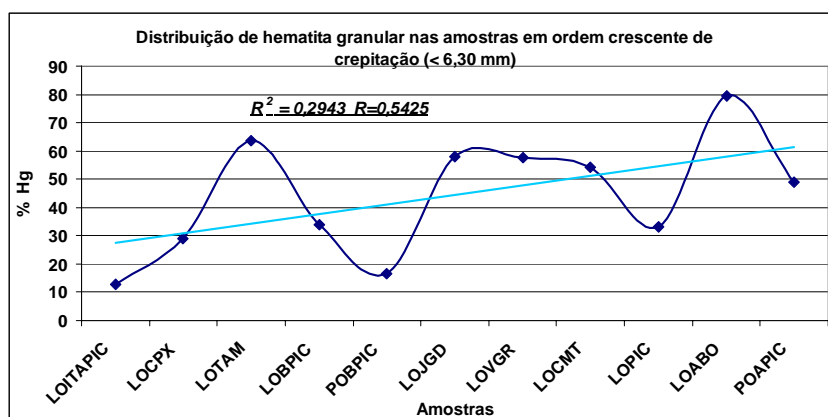


Figura 5.194 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

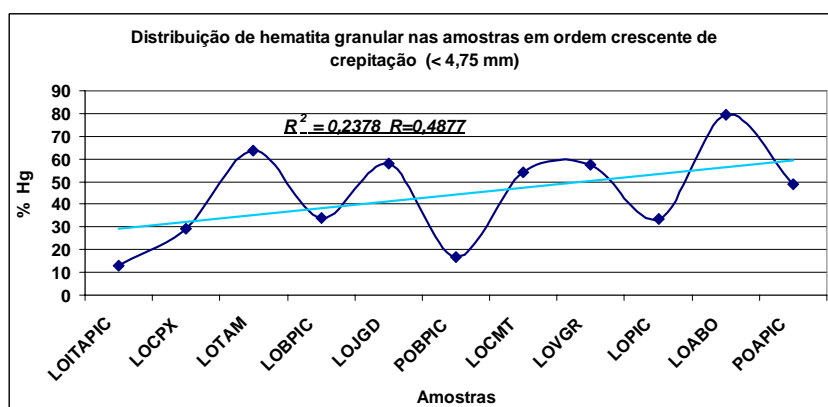


Figura 5.195 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

As figuras 5.196 e 5.197 referentes à hematita sinuosa, demonstram o mesmo comportamento diretamente proporcional aos índices de crepitação, com linhas de tendências e fatores de correlações positivos (valores de 0,2921 na fração <6,30 mm e 0,1697 na fração <4,75 mm). A hematita sinuosa representa um estágio intermediário entre a martita e hematita granular, portanto apresenta um comportamento semelhante ao da mesma, não apenas na crepitação, mas em todas as variáveis metalúrgicas mensuradas no trabalho.

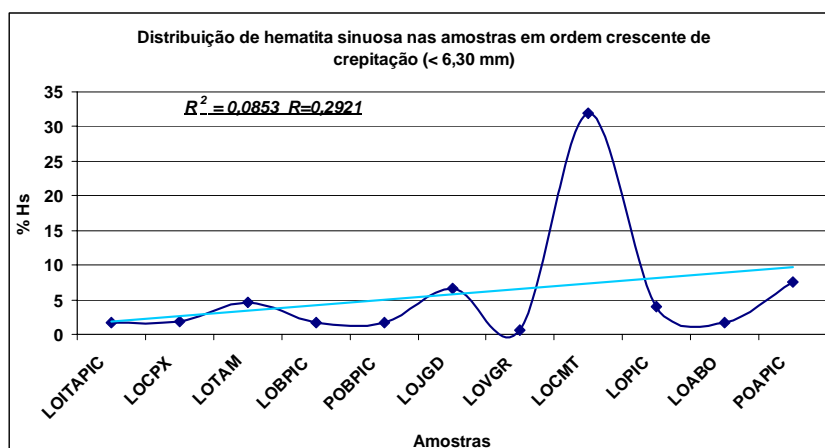


Figura 5.196 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

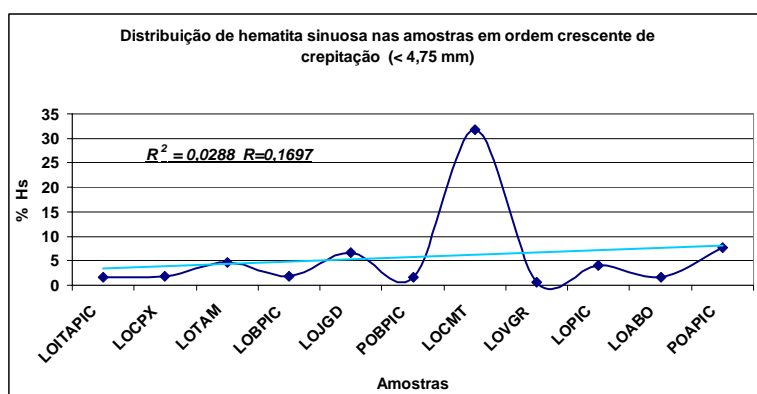


Figura 5.197 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Os minerais martita, hematita lamelar e goethita, embora apresentem alta variabilidade nos percentuais, os coeficientes de correlações associados às linhas de tendências são negativos (martita: -0,3596 na fração <6,30 mm e -0,3803 na fração <4,75 mm; hematita lamelar: -0,3222 na fração <6,30 mm e -0,1778 na fração <4,75 mm; goethita: -0,3040 na fração <6,30 mm e -0,2902 na fração <4,75 mm). Quanto menor o percentual desses minerais nos produtos granulados, maior a crepitação. A hipótese mais provável para esta relação inversa seria a diminuição da porosidade intrínseca com a redução dos

percentuais desses minerais, elevando a geração de finos durante o choque térmico do produto granulado (figuras 5.198 a 5.203).

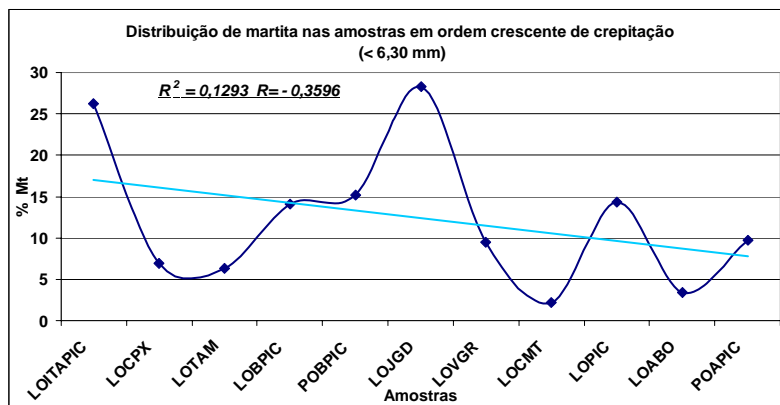


Figura 5.198 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

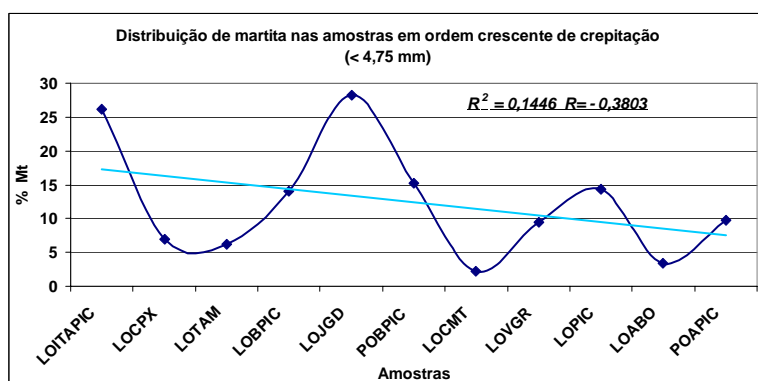


Figura 5.199 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

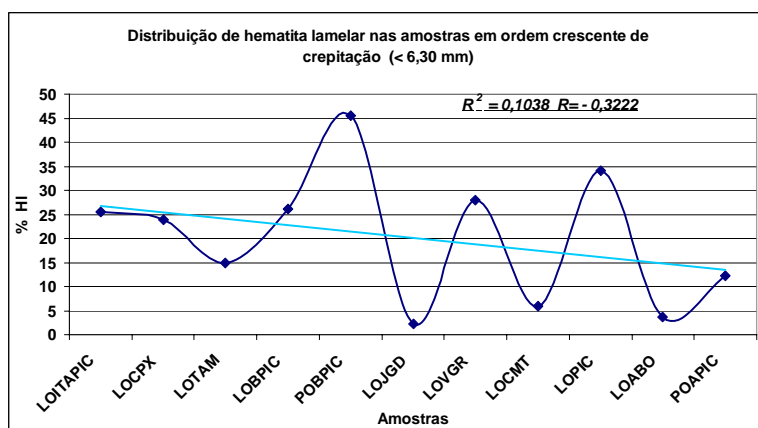


Figura 5.200 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

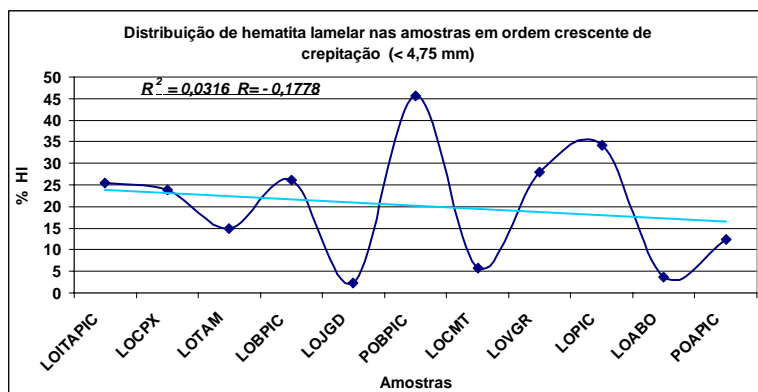


Figura 5.201 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

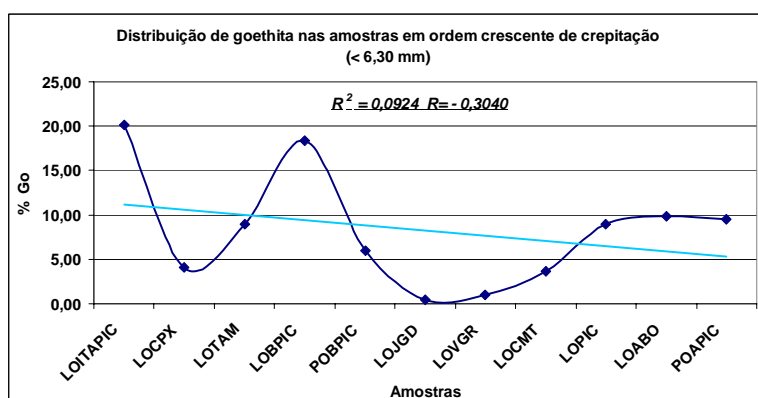


Figura 5.202 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

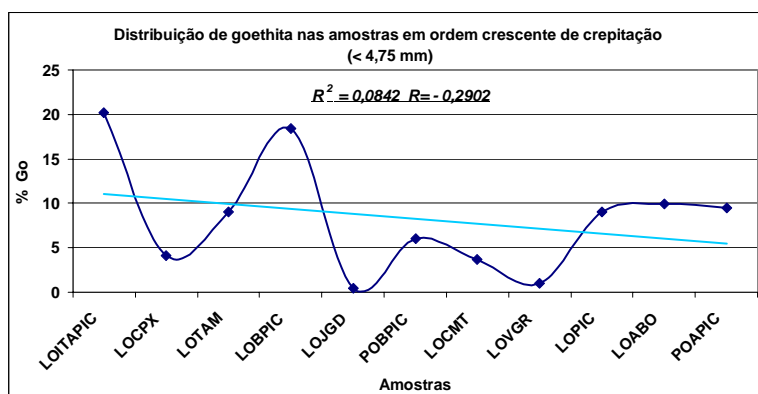


Figura 5.203 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

A porosidade relativa mostra correlações negativas nas duas frações granulométricas, com base nas linhas de tendências (valores de -0,5026 na fração <6,30 mm e -0,5079 na fração <4,75 mm). O produto granulado submetido ao choque térmico durante o ensaio de crepitação, apresenta uma degradação maior quanto menor a porosidade relativa e vice versa (figuras 5.204 e 5.205). Uma das explicações para o fenômeno seria uma baixa absorção da energia provocada pelo choque térmico (menor percentual de porosidade), causando um aumento da degradação e geração de finos.

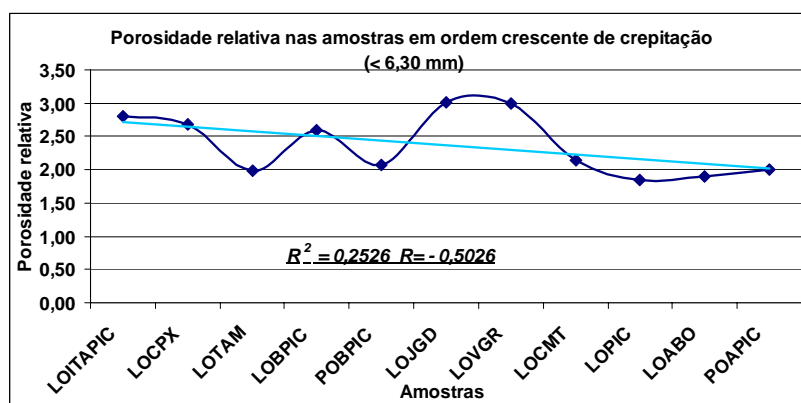


Figura 5.204 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

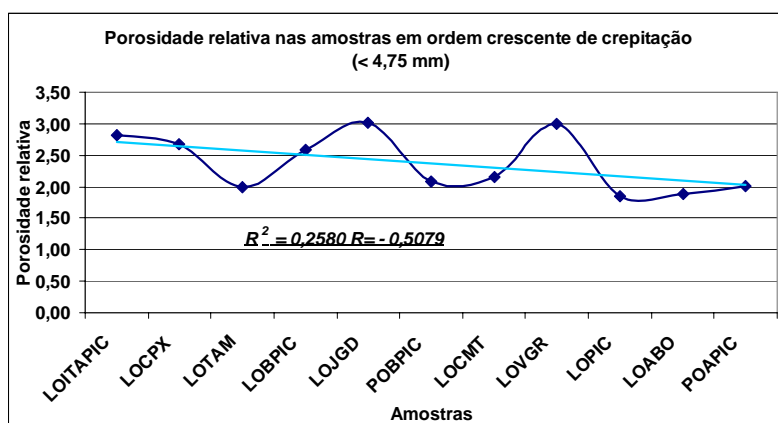


Figura 5.205 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de crepitação na fração <4,75 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

Os índices de tamboramento variam de 63,80 a 88,70 % (fração >6,30 mm) e estão representados em ordem crescente na figura 5.206. A distribuição mineralógica encontra-se detalhada na figura 5.207. Os percentuais dos minerais hematita granular e lamelar são diretamente proporcionais aos índices de tamboramento, conforme linhas de tendências e respectivos fatores de correlações (valores de 0,4214 e 0,1876, respectivamente). Os dois minerais apresentam baixo grau de contaminações ou alterações, níveis elevados de cristalizações e faces bem definidas, conferindo-lhes maior resistência mecânica, razão pela qual apresentam uma relação direta com os índices de tamboramento (figuras 5.208 e 5.209).

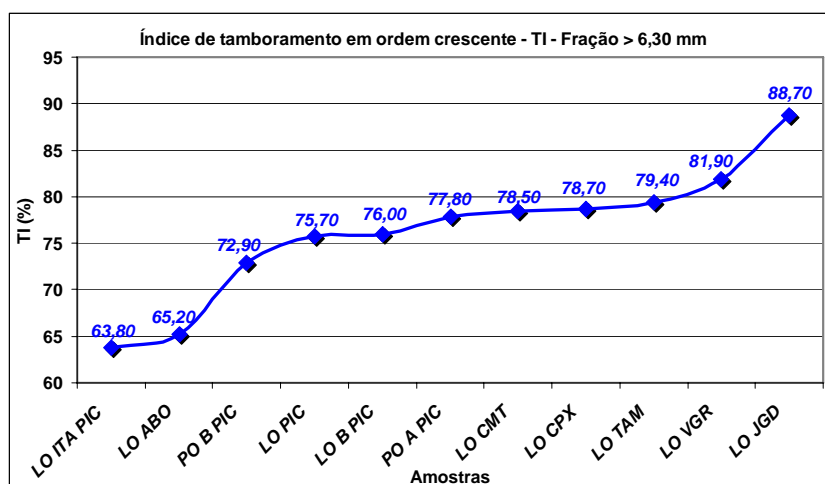


Figura 5.206 – Valores dos índices de tamboramento (TI), fração >6,30 mm ordenados de forma crescente.

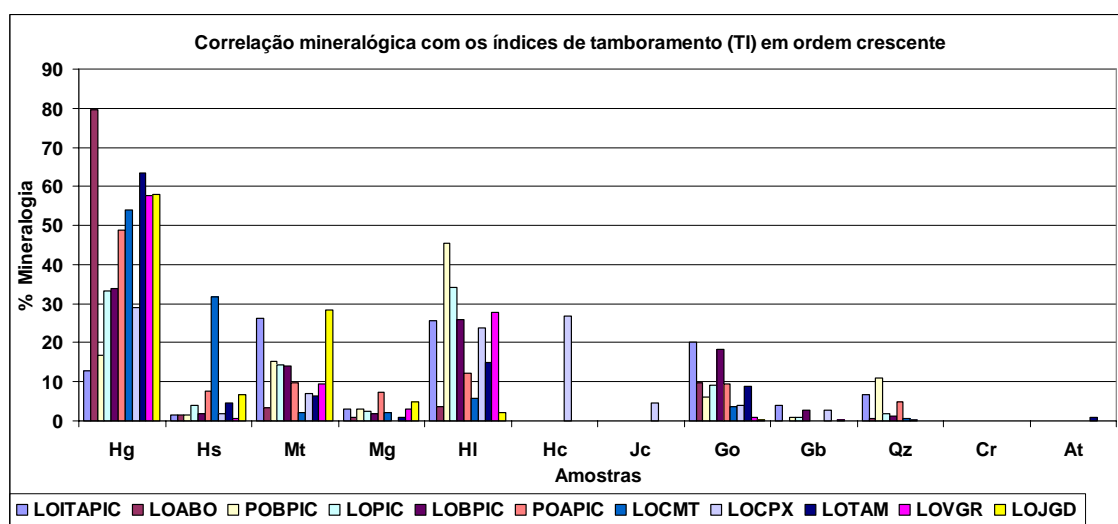


Figura 5.207 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente aos índices de tamboramento (fração >6,30 mm).

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar; **Hc:** hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

O conjunto dos minerais martita, hematita lamelar e goethita apresentam um comportamento inversamente proporcional aos índices de tamboramento, conforme linhas de tendências e respectivos fatores de correlações (valores de -0,0686, -0,3384 e

-0,7073, respectivamente), embora apresentem alta variação de percentuais. As tendências demonstram que os minerais mais alterados, principalmente a goethita, podem ser utilizados como indicador de baixa resistência mecânica de produtos granulados de minério de ferro. A hematita lamelar, pelo formato placóide e delgado, também rompe facilmente. A martita representa um estágio de alteração da magnetita, portanto sua resistência mecânica é menor, embora não esteja refletida na correlação (figuras 5.210, 5.211 e 5.212).

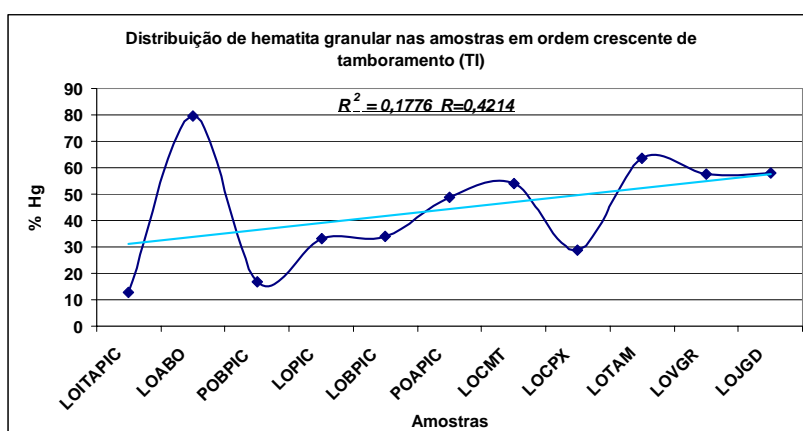


Figura 5.208 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

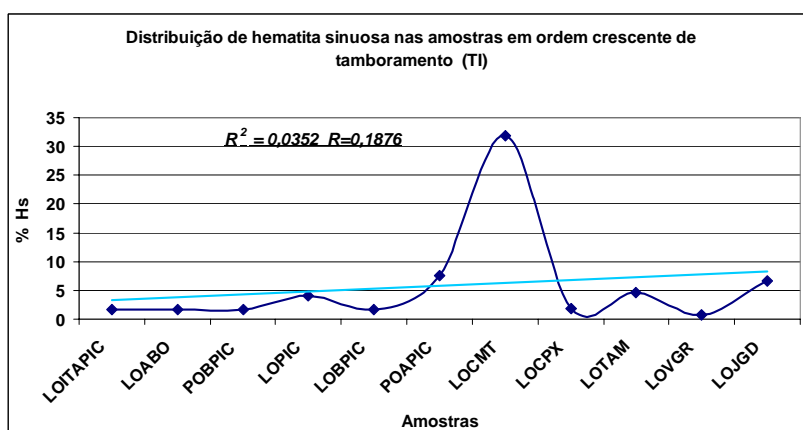


Figura 5.209 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Aparentemente a porosidade relativa elevada significaria menor resistência mecânica do produto granulado, mas o gráfico da figura 5.213 mostra o contrário, com uma linha de tendência diretamente proporcional ao aumento dos índices de tamboramento. Os minérios que geram menor quantidade de finos nos testes de tamboramento, apresentam porosidade relativa mais alta, conforme linha de tendência e coeficiente de correlação associado (valor de 0,4256). A porosidade intrínseca dos minerais não afeta significativamente a resistência mecânica.

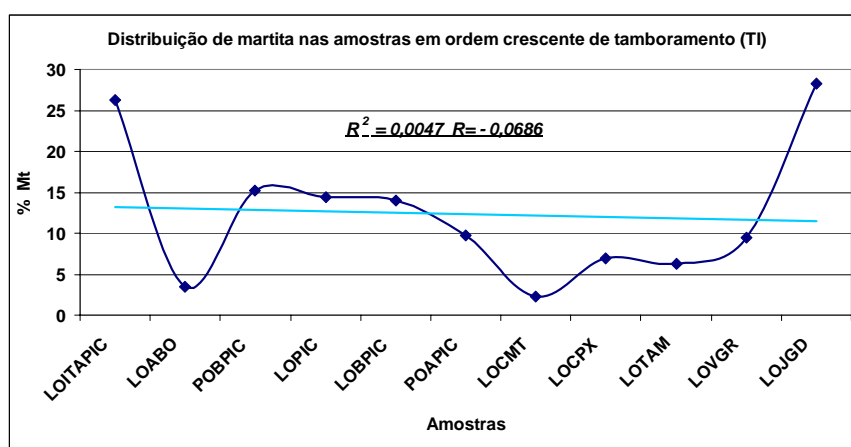


Figura 5.210 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

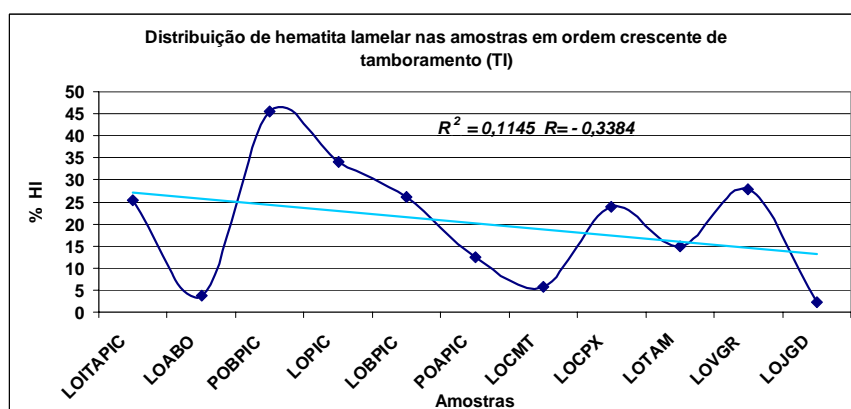


Figura 5.211 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

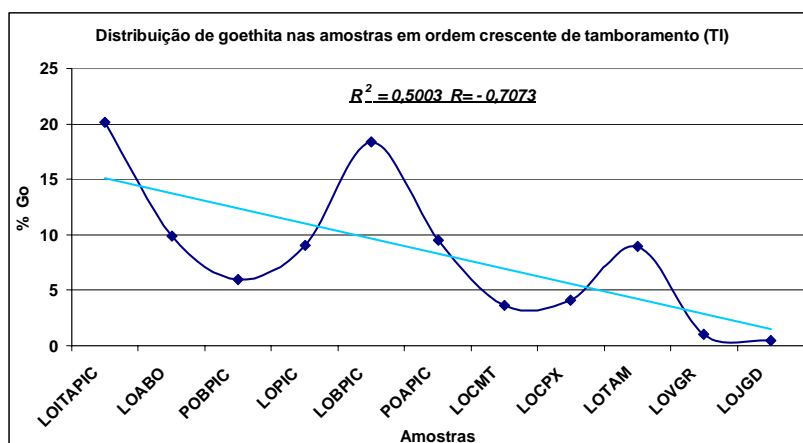


Figura 5.212 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

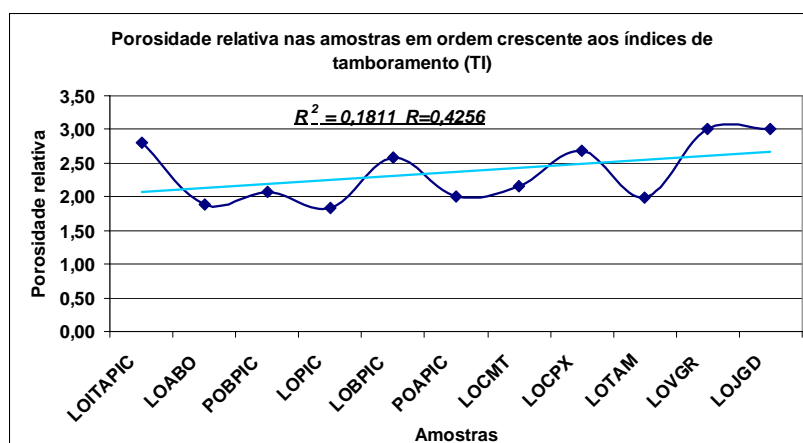


Figura 5.213 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de tamboramento (TI) na fração >6,30 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

O índice de abrasão varia de 8,10 a 26,50 %, ordenados de forma crescente, considerando o percentual de material abaixo de 0,50 mm (figura 5.214). Resulta das diferenças de resistência mecânica dos tipos de produtos objeto de estudo. A distribuição mineralógica das amostras encontra-se sumariada na figura 5.215. Os minerais hematita granular e sinuosa são inversamente proporcionais aos índices de abrasão, conforme linhas de tendências e coeficientes de correlações associados (valores

de -0,2943 e -0,2553, respectivamente). A redução dos percentuais desses minerais, que possuem micro estrutura bem definida, principalmente o formato dos grãos e faces, fragiliza os produtos granulados e vice versa (figuras 5.216 e 5.217).

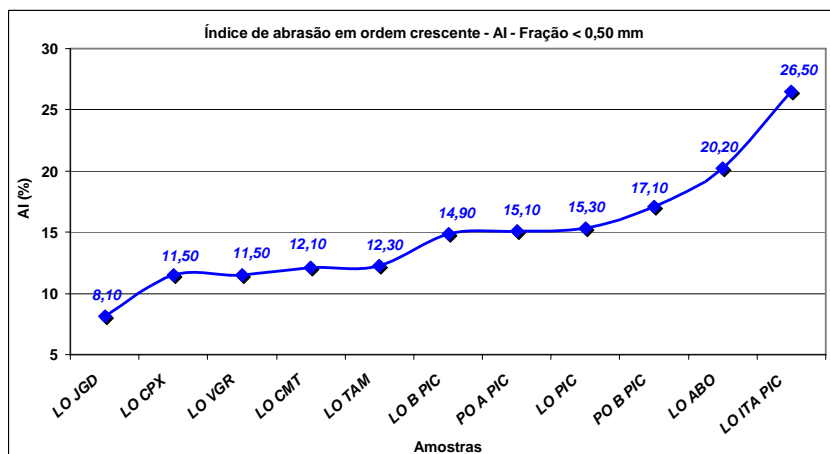


Figura 5.214 – Valores dos índices de abrasão (AI), fração <0,50 mm, ordenados de forma crescente.

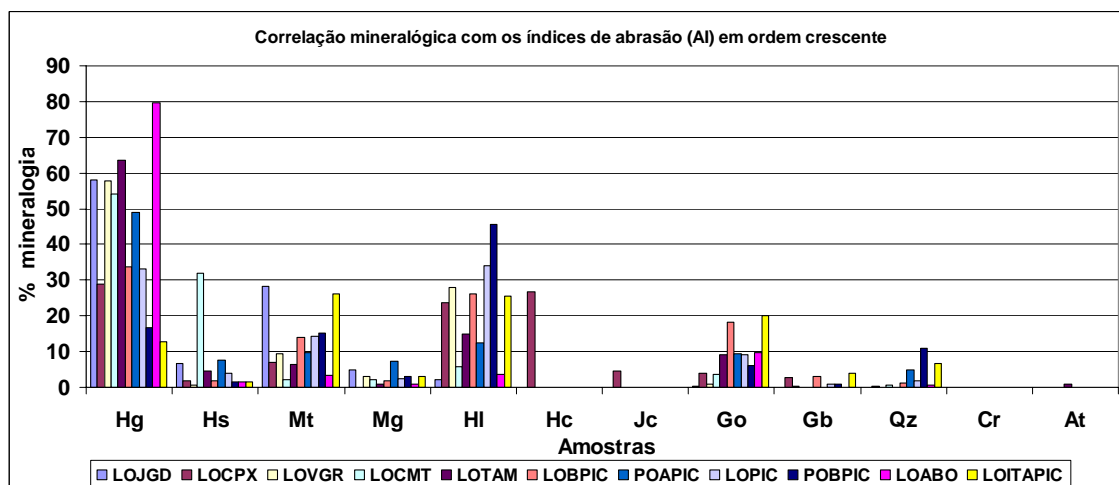


Figura 5.215 – Distribuição mineralógica média das amostras ordenadas em ordem crescente aos índices de abrasão (fração <0,50 mm).

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo; **Cr:** carbonato; **At:** agregado terroso.

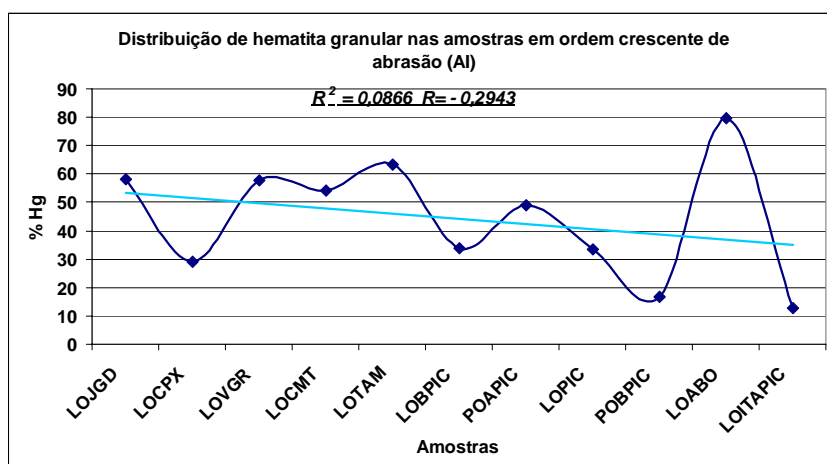


Figura 5.216 – Distribuição da hematita granular nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

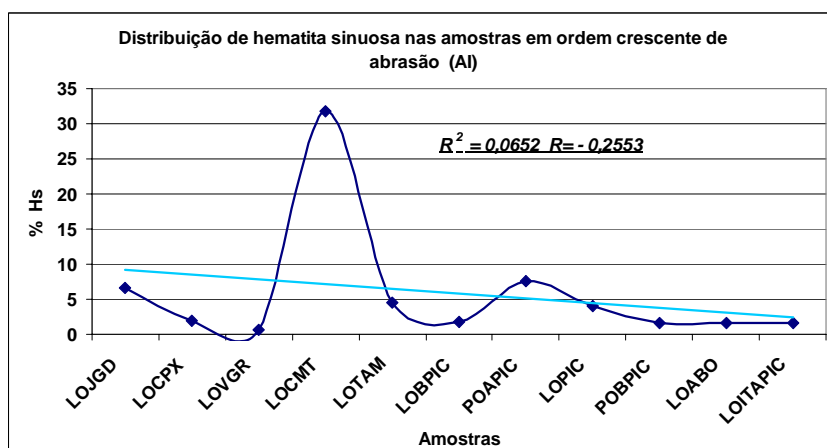


Figura 5.217 – Distribuição da hematita sinuosa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Os minerais martita, hematita lamelar e goethita são diretamente proporcionais aos índices de abrasão, com base nas linhas de tendências e respectivos coeficientes de correlação (valores de 0,0742, 0,3172 e 0,6996, respectivamente). O mineral hidratado que atua mais fortemente na geração dos finos <0,50 mm é a goethita, gerado pela ação dos processos de alteração supergênica. A hematita lamelar, pelo formado delgado e acicular, também gera finos. A martita tem um comportamento intermediário, com baixo coeficiente de correlação (figuras 5.218, 5.219 e 5.220).

A porosidade relativa varia inversamente proporcional aos índices de abrasão, com base na linha de tendência e coeficiente de correlação (valor de -0,4993). Esta constatação confirma o gráfico de porosidade relativa dos índices de tamboramento, que tem uma variação contrária. A porosidade relativa elevada não é determinante para a geração de finos e não fragiliza do produto granulado (figura 5.221).

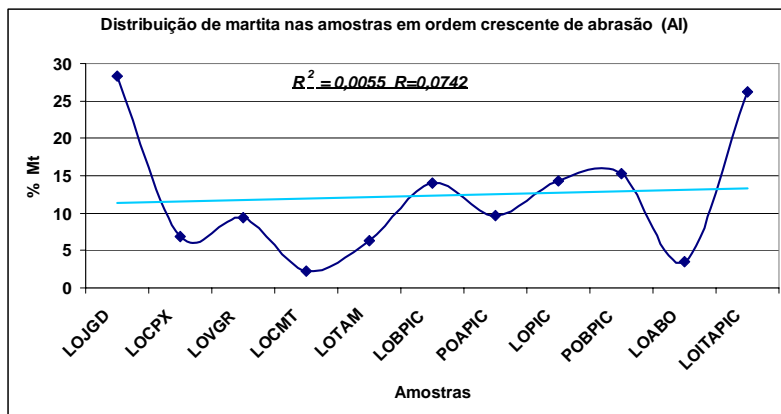


Figura 5.218 – Distribuição da martita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

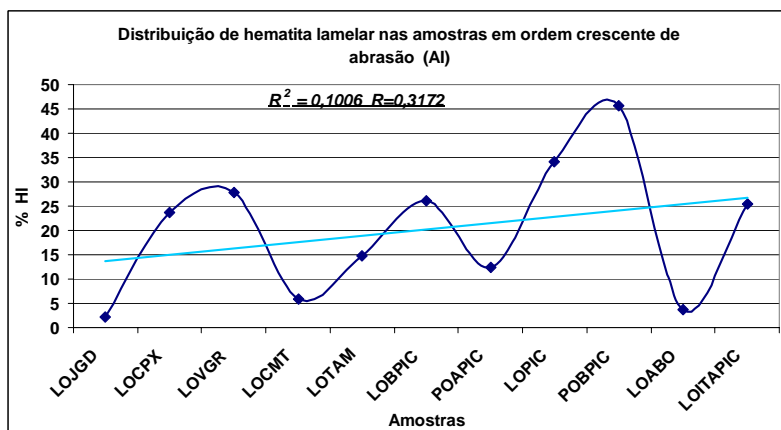


Figura 5.219 – Distribuição da hematita lamelar nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

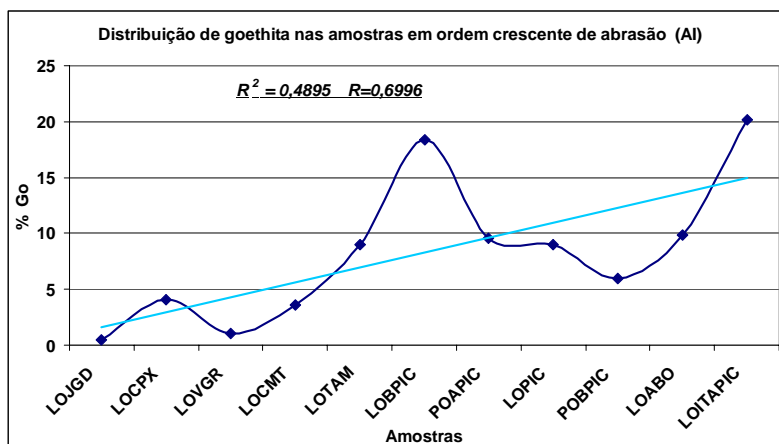


Figura 5.220 – Distribuição da goethita nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

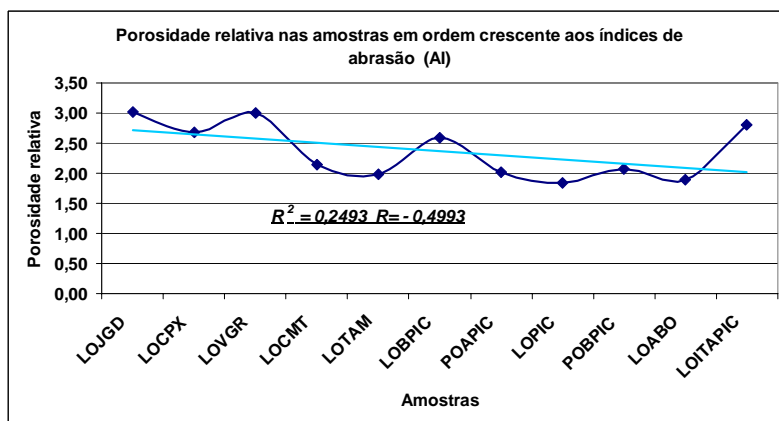


Figura 5.221 – Distribuição da porosidade relativa nas amostras ordenadas de forma crescente aos índices de abrasão (AI) na fração <0,50 mm, com linha de tendência e respectivo coeficiente de correlação.

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

A tabela V.8 resume as correlações detalhadas anteriormente, entre os principais minerais e a porosidade relativa, em termos quantitativos, com as variáveis metalúrgicas mensuradas nos produtos granulados de minério de ferro.

Tabela V.8 – Resumo das correlações entre os principais minerais e a porosidade relativa, com as variáveis metalúrgicas.

Principais minerais	Ensaio Metalúrgico								
	Midrex Linder Test		LS	Redutibilidade	RDI	Índice de Crepitação		Índ. Tamboramento	
	GM (%)	FG (<3,35 mm)	(ppm)	(% de Redução)	(% < 2,80 mm)	(< 4.75 mm)	(< 6.30 mm)	TI	AI
Hm granular (Hg)	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓
Hm sinuosa (Hs)	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓
Martita (Mt)	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑
Hm lamelar (Hl)	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑
Goethita (Go)	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑
Porosidade relativa	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓
			OBS: Resumo das correlações mineralógicas e metalúrgicas Diretamente proporcional ↑ Inversamente proporcional ↓						

Porosidade relativa = 1: < 10%; 2: entre 10 e 20 %; 3: > 20 %.

5.7 – Avaliação granulométrica, química e mineralógica das frações finas geradas pelos ensaios metalúrgicos de tamboramento.

A geração de finos através do manuseio e transporte (“handling”) de produtos granulados de minério de ferro tem sido reduzido pela ação de repeneiramento dos produtos nos portos marítimos antes do embarque nos navios. Com esse procedimento ocorrem perdas econômicas significativas, pela transformação de 10 a 15% do produto granulado em sinter feed (fração <6,30 mm), com menor preço de venda.

Em termos comerciais, alguns clientes situados em países com períodos climáticos com excesso de chuvas (umidade elevada) ou com acúmulo de gelo no inverno, ao receber carregamentos de granulados de minério de ferro com excesso de material fino, fração abaixo de <6,30 mm, têm sérias dificuldades no descarregamento dos porões dos navios, por problemas relacionados às correias transportadoras e aos chutes de transferências. O material fino (matriz) atua como um “ligante” em relação aos fragmentos mais grosseiros. A agregação (“sticking”) dificulta o transporte, com entupimento dos chutes de transferências, empilhamento e repeneiramento do material.

O principal objetivo do estudo dos finos gerados pelos ensaios de tamboramento é de buscar informações tecnológicas de laboratório, incluindo as descrições mineralógicas, simulando a degradação do produto ao longo do transporte até os clientes. O estudo está concentrado na fração <6,30 mm, onde estariam os materiais com granulometria <1,00 mm, que é a fração responsável pelos efeitos de agregação dos fragmentos mais grosseiros, incluindo os tipos argilosos (vide anexos 4 e 7).

As curvas granulométricas da figura 5.222 mostram uma distribuição maior da fração <6,30 >1,00 mm, com média de 66,34%, enquanto a média da fração <1,00 mm é de 33,66%, sendo de aproximadamente um terço do total.

Os teores de ferro total são diferentes, sendo a média de 66,00% na fração <6,30 >1,00 mm e 62,79% na fração <1,00 mm. As diferenças de teores mais significativas estão associadas aos minérios mais contaminados, principalmente por sílica e alumina. Nos

minérios mais ricos, os teores na fração <1,00 mm são ligeiramente inferiores (figura 5.223).

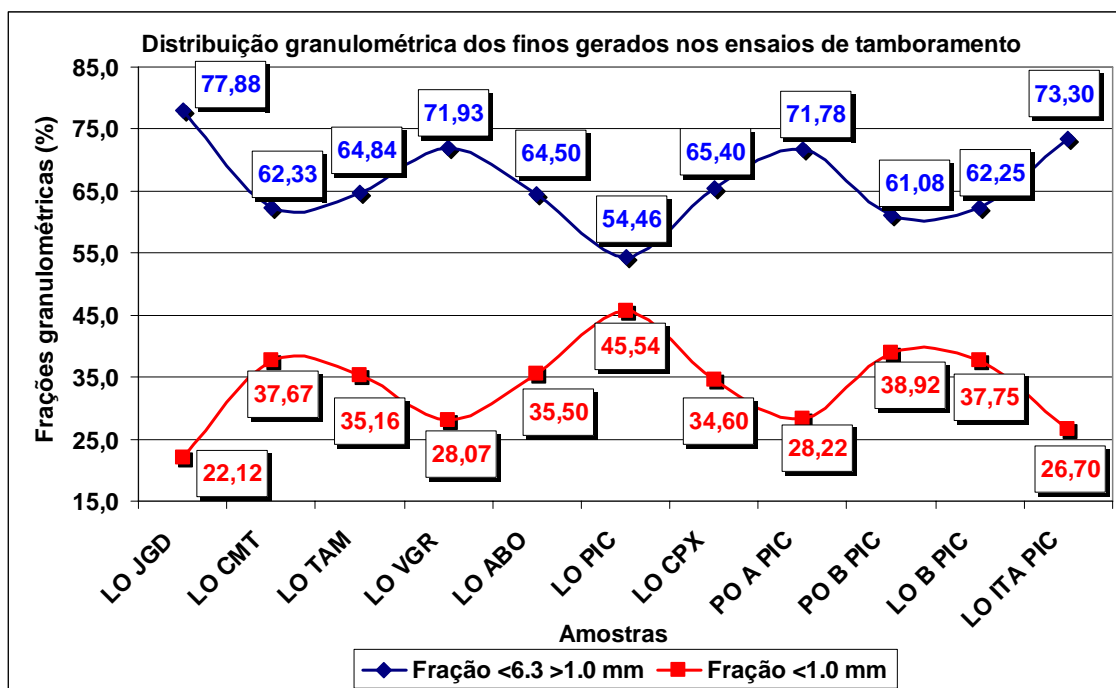


Figura 5.222 – Curvas de distribuição granulométrica das frações abaixo de 6,30 mm, derivadas dos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.

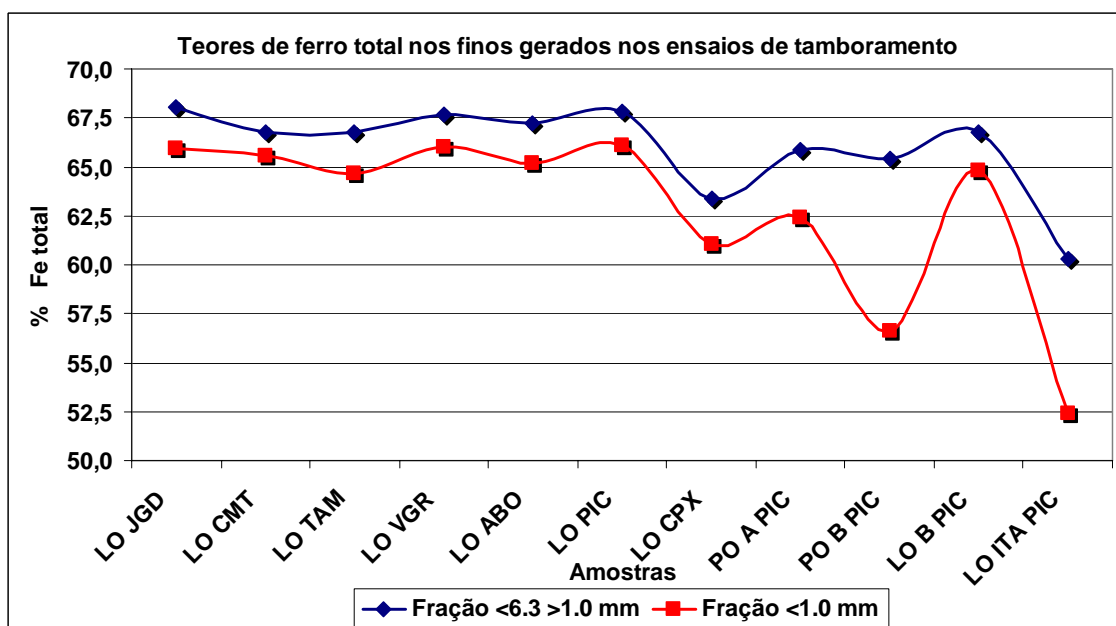


Figura 5.223 – Teores de ferro total nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.

Os teores médios de FeO são similares, sendo de 0,32% na fração <6,30 >1,00 mm e 0,34% na fração <1,00 mm, não fornecendo informação técnica relevante. Na amostra LOTAM a diferença de teores é mais pronunciada (0,17%), sendo o teor mais elevado na fração mais grosseira (figura 5.224).

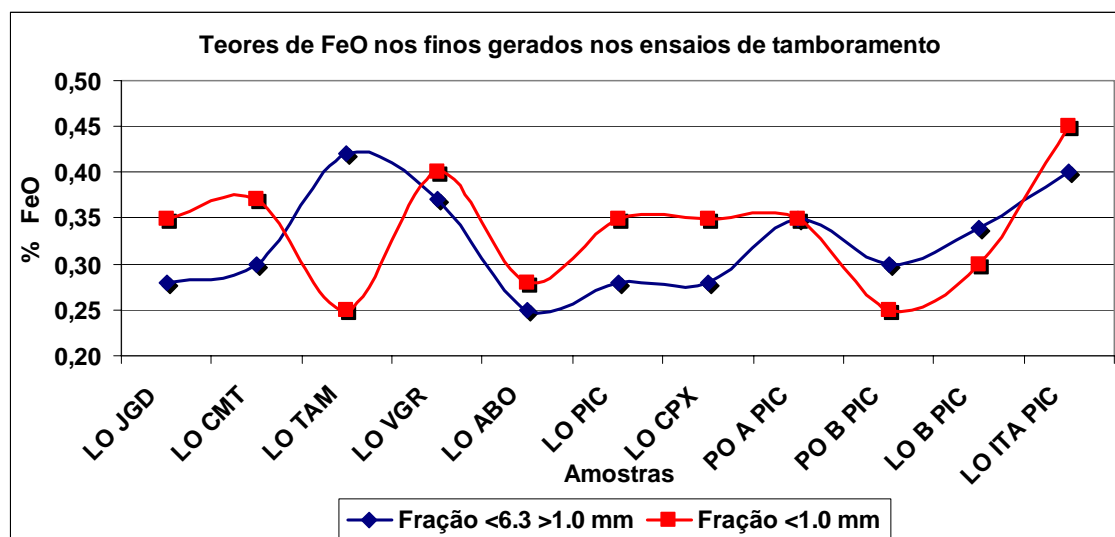


Figura 5.224 – Teores de FeO nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.

As diferenças mais significativas ocorrem nas seguintes variáveis químicas: sílica, alumina e perda por calcinação (PPC). A sílica média na fração <6,30 >1,00 mm é de 1,94%, enquanto na fração <1,00 mm o teor médio é de 4,29%. Em três amostras (POAPIC, POBPIC e LOITAPIC) os teores variam entre 7,55 a 13,74%, estando diretamente relacionadas a produtos com contribuição itabirítica (figura 5.225).

Os teores médios de alumina são de 1,11% na fração <6,30 >1,00 mm e 2,07% na fração granulométrica <1,00 mm. Esta diferença é significativa, pois coincide com teores mais elevados de sílica e os minerais hidratados à base de argilas, podem atuar como uma espécie de “cimento”, promovendo a aglomeração dos fragmentos maiores, dificultando o manuseio do produto (figura 5.226). As frações granulométricas mais finas têm percentuais maiores de umidade, pois os minerais mais aluminosos são naturalmente hidratados e também apresentam um comportamento de baixa permeabilidade, reduzindo o escoamento da água livre. Em condições climáticas frias, a

água livre pode congelar, impondo dificuldades significativas no manuseio dos produtos granulados de minério de ferro. Os fragmentos maiores, dependendo da quantidade de material finos, podem sofrer uma “agregação”, condicionada pela matriz fina mais úmida ou parcialmente congelada.

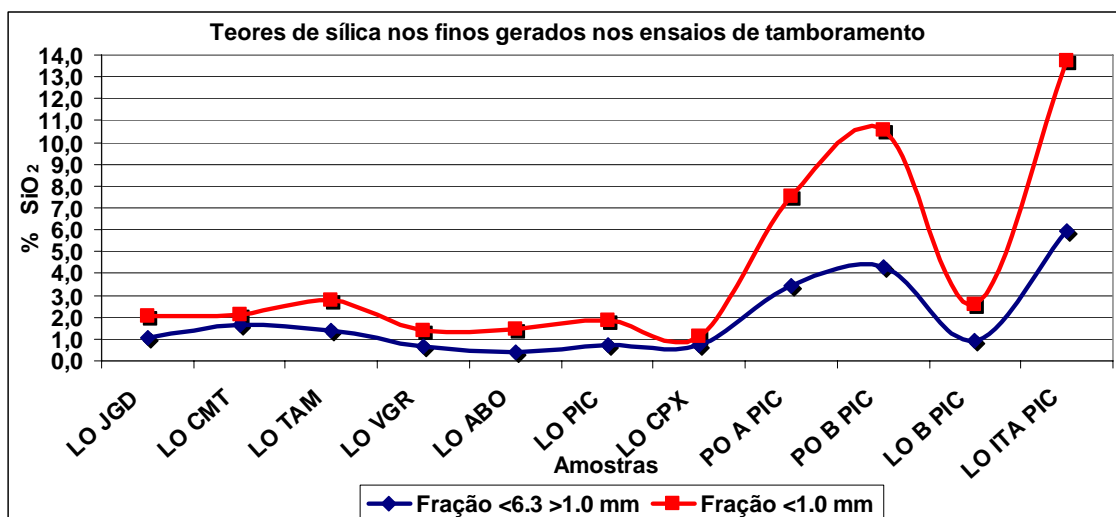


Figura 5.225 - Teores de sílica nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.

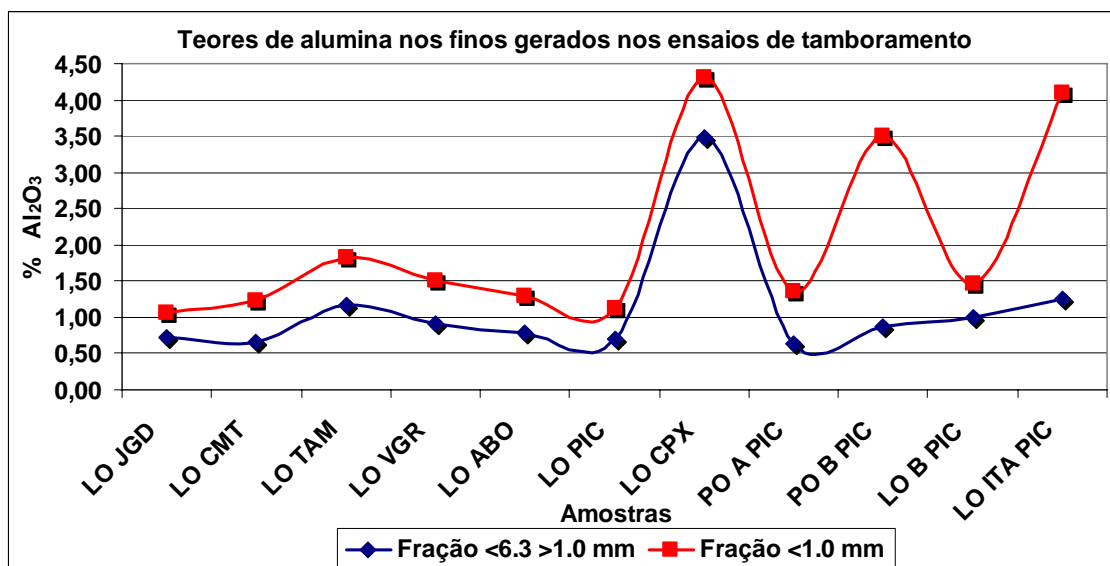


Figura 5.226 - Teores de alumina nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.

Os resultados médios da perda por calcinação (PPC) são de 1,86% para a fração <6,30 >1,00 mm e 2,56% para a fração <1,00 mm, coerente com os teores de alumina e presença maior de minerais hidratados na fração com granulometria menor (figura 5.227).

O gráfico da figura 5.228 mostra os resultados da perda por calcinação (PPC) nas frações finas e nas amostras médias dos produtos. O teor médio de PPC da amostra dos produtos (1,84%) é próximo ao da fração <6,30 >1,00 mm (1,86%), confirmando que os minerais hidratados estão com concentração mais elevada nas frações <1,00 mm.

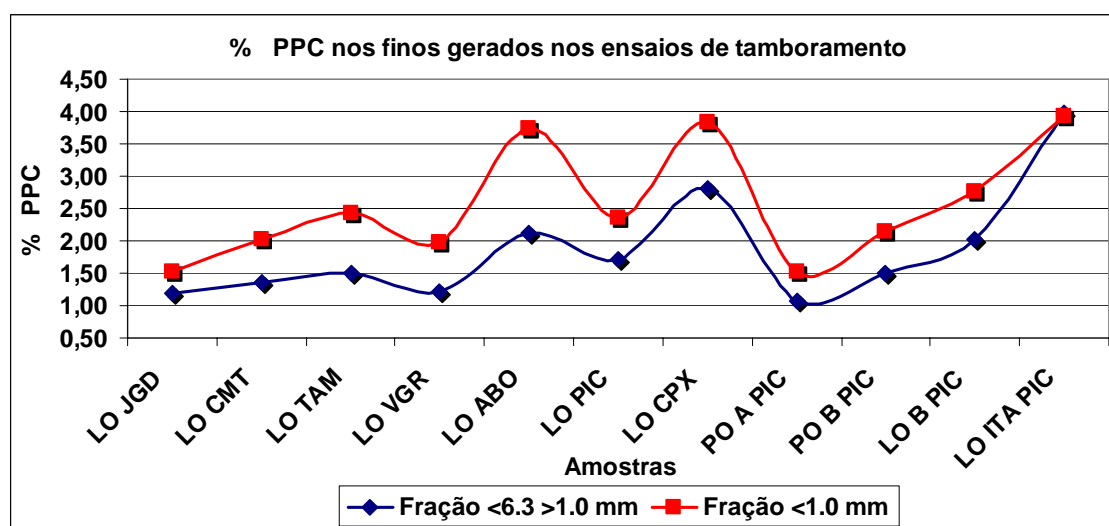


Figura 5.227 - Teores de perda por calcinação (PPC) nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento dos produtos granulados de minério de ferro.

A correlação entre as variáveis alumina e sílica na fração <1,00 mm é diretamente proporcional (valor de 0,5605). Os minerais argilosos podem atuar como “ligas”, promovendo a agregação da matriz fina.

A correlação entre as variáveis alumina e perda por calcinação também é diretamente proporcional (valor de 0,6109). Os minerais hidratados presentes nas frações mais finas elevam os teores de alumina e PPC, geralmente argilosos, sendo os principais responsáveis pela agregação das partículas maiores.

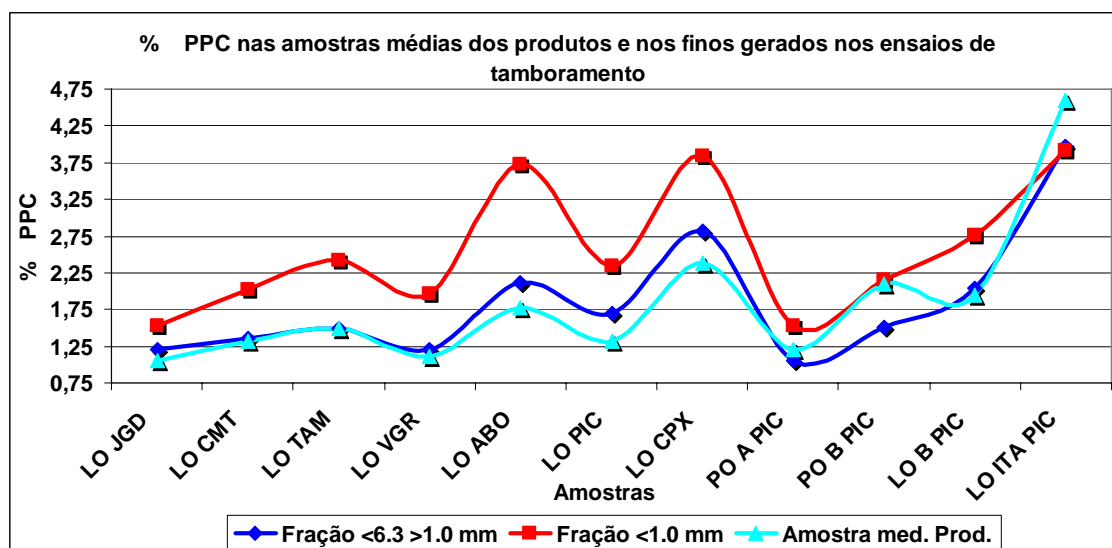


Figura 5.228 – Teores de perda por calcinação (PPC) nas frações finas geradas nos ensaios de tamboramento e das amostras médias dos produtos.

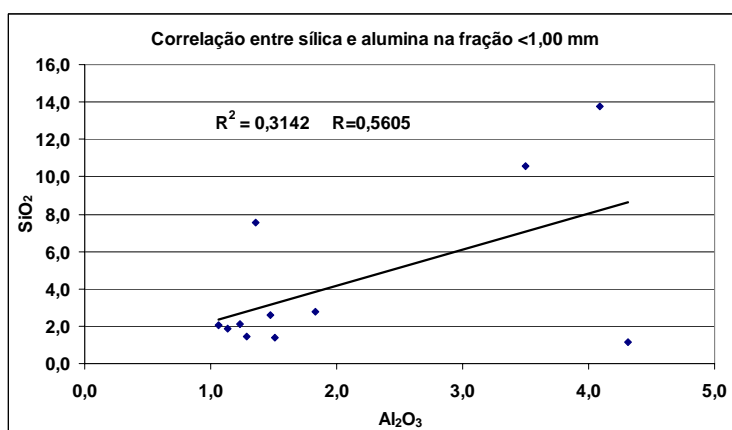


Figura 5.229 – Correlação entre sílica e alumina na fração <1,00 mm.

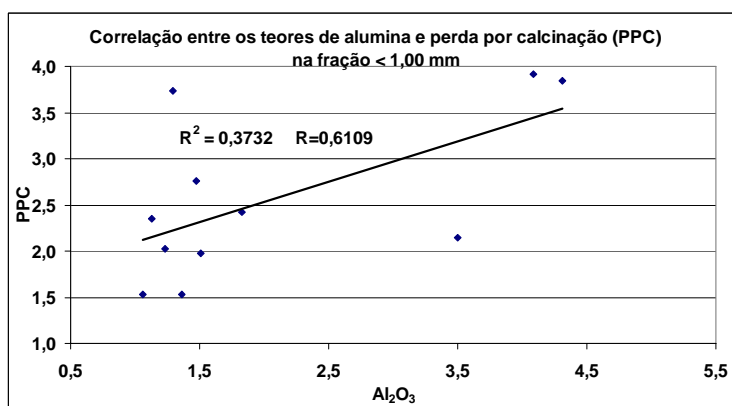


Figura 5.230 – Correlação entre alumina e perda por calcinação na fração <1,00 mm.

Em termos de distribuição mineralógica, não há diferenças significativas na concentração dos minerais hematitas granulares, hematitas lamelares e martitas, nas frações <6,30 >1,00 mm e <1,00 mm. As concentrações de goethitas, gibbsitas e quartzo são mais elevados na fração granulométrica mais fina (<1,00 mm), conforme figuras 5.231 e 5.232. As informações mineralógicas confirmam os altos teores de alumina, sílica e perda por calcinação nas amostras <1,00 mm, quando relacionadas às frações grosseiras. Os minerais hidratados goethita e gibbsita seriam os agentes físicos responsáveis pelos efeitos de “colagem” dos fragmentos maiores de material granulado (figura 5.233).

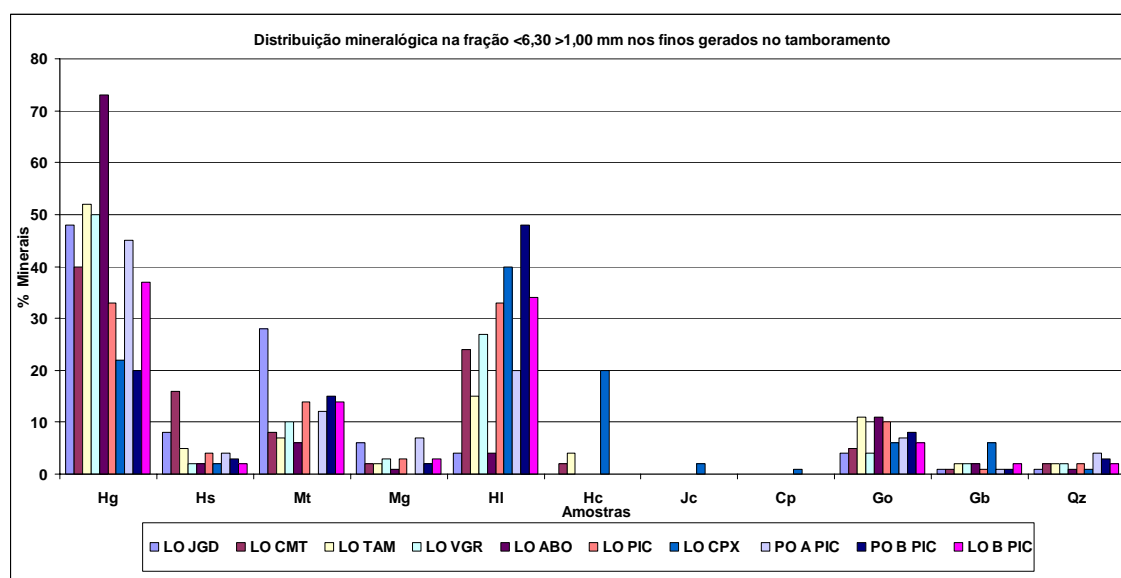


Figura 5.231 – Distribuição mineralógica na fração <6,30 >1,00 mm, dos finos gerados nos ensaios de tamboramento.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo;
Cp: criptomelana/pirolusita;

Na figura 5.234 estão representados os percentuais médios dos minerais goethita, gibbsita e quartzo nas tipologias e nas frações <6,30 >1,00 mm e <1,00 mm. Os minerais goethita e gibbsita são provenientes das tipologias associadas à canga, pela menor resistência mecânica dessas tipologias, principalmente nas frações <1,00 mm.

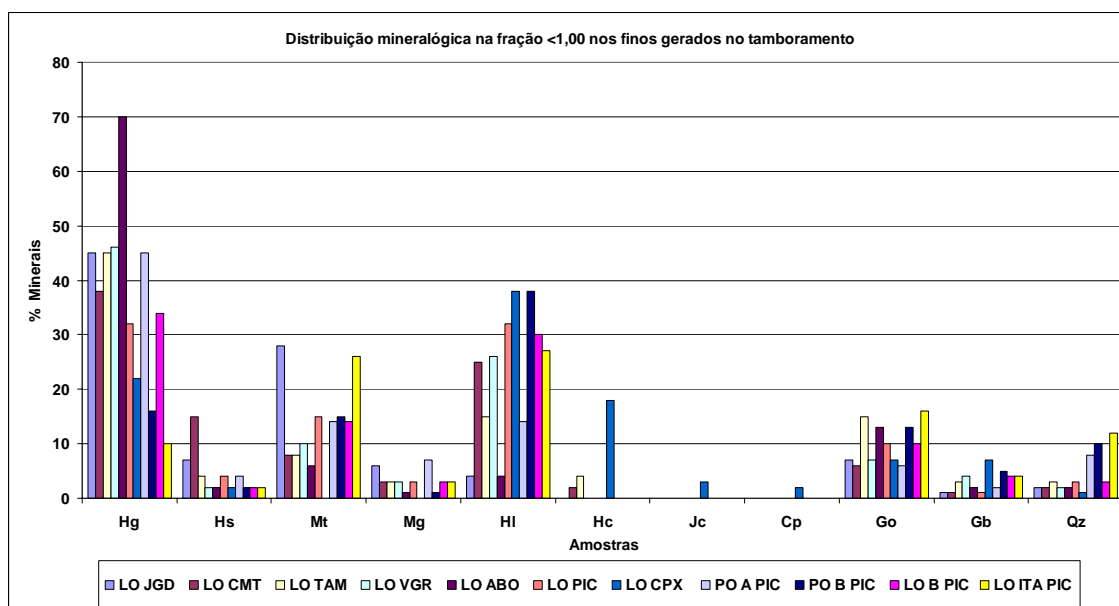


Figura 5.232 – Distribuição mineralógica na fração <1,00 mm, dos finos gerados nos ensaios de tamboramento.

Hg: hem. granular; **Hs:** hem. sinuosa; **Mt:** martita; **Mg:** magnetita; **HI:** hem. lamelar;
Hc: hem. microcristalina; **Jc:** jacobsita; **Go:** goethita; **Gb:** gibbsita; **Qz:** quartzo;
Cp: criptomelana/pirolusita

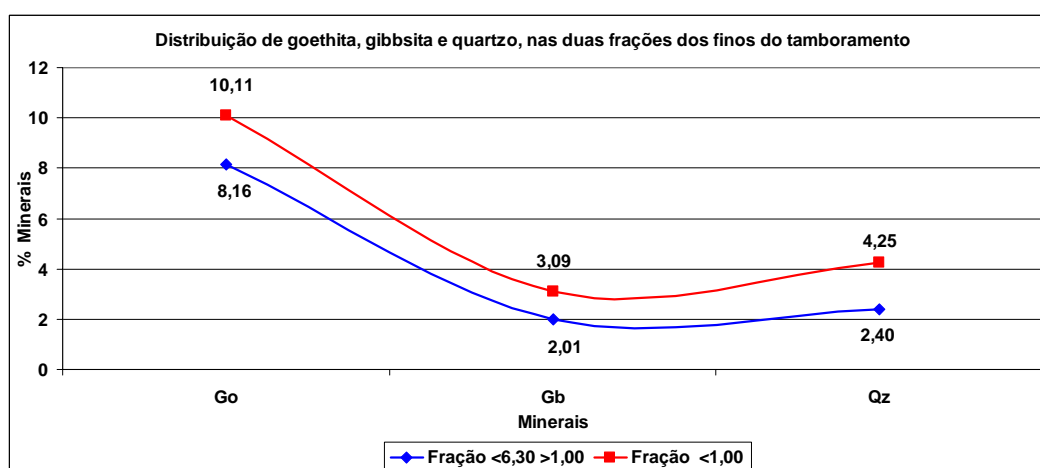


Figura 5.233 – Distribuição dos percentuais mineralógicos da goethita, gibbsita e quartzo nas frações <6,30 >1,00 mm e <1,00 mm.

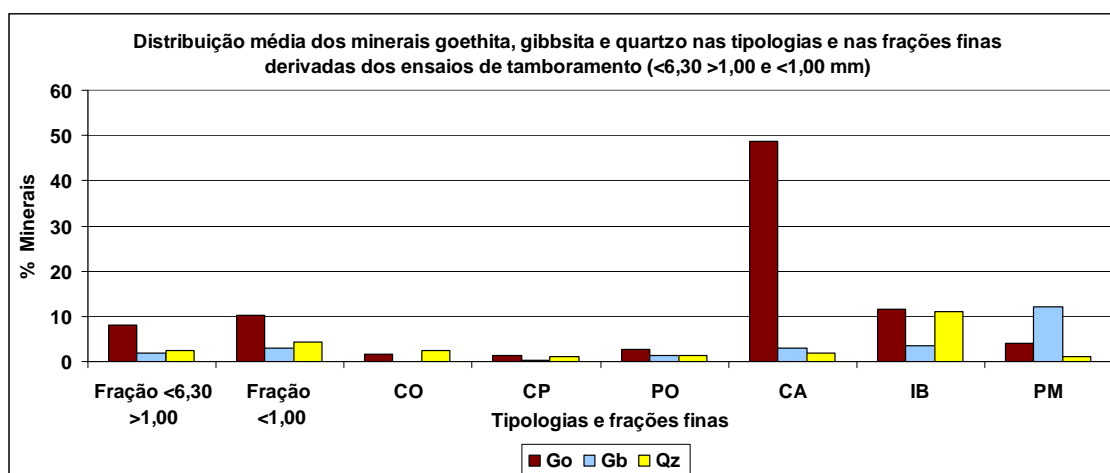


Figura 5.234 – Distribuição média dos minerais goethita, gibbsita e quartzo nas tipologias e nas frações geradas pelos ensaios de tamboramento.

CO: compacto; **CP:** compacto poroso; **PO:** poroso; **CA:** canga; **IB:** itabirito; **PM:** proto-minério.

O estudo de avaliação química e mineralógica dos finos gerados nos ensaios de tamboramento caracterizou a influência das variáveis químicas alumina, perda ao fogo e a presença dos minerais goethita e gibbsita (minerais hidratados), como os principais fatores químicos e físicos, causadores da “colagem” dos fragmentos maiores, comportando-se como uma matriz mais plástica e agregando os fragmentos maiores.

Na tabela V.9 encontram-se resumidas as principais variáveis físicas, químicas e mineralógicas definidas como significativas na avaliação dos finos gerados pelos ensaios de tamboramento, bem como o comportamento relativo das mesmas nas duas faixas granulométricas consideradas na avaliação (<6,30 >1,00 mm e <1,00 mm).

Tabela V.9 – Principais variáveis associadas aos finos gerados pelo tamboramento.

Fração gran. (mm)	% Granul.	Fe Tot.	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	PPC	Goethita	Gibbsita	Quartzo
<6,30 >1,00	↑	↑	↔	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<1,00	↓	↓	↔	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Principais correlações das frações finas do tamboramento:									
	↑	Valores relativos mais altos da variável ou mineralogia							
	↓	Valores relativos mais baixos da variável ou mineralogia							
	↔	Valores relativos equivalentes							

6 – CONCLUSÕES

As conclusões mais relevantes da Tese de caracterização dos produtos granulados de minério de ferro encontram-se sumariadas a seguir:

6.1 – O tamanho médio de partícula das amostras estudadas é de 19,89 μm , tendo sido determinado que os minérios mais compactos geram produtos com curvas granulométricas mais grosseiras e minérios médios e macios geram produtos com curvas granulométricas mais finas.

6.2 – Os valores mais significativos das correlações entre as principais variáveis químicas são: ferro total e sílica (-0,8225); alumina e perda ao fogo (0,7455); manganês e magnésio (0,5655); alumina e ferro total (-0,5142); os teores médios dos elementos zinco, sódio e potássio são, respectivamente, 0,005 %, 0,005% e 0,012 %.

6.3 – Os teores médios de ferro total são mais baixos nas amostras com altos teores de contaminantes, principalmente sílica, alumina e perda ao fogo; o teor médio de FeO nas amostras médias é de 0,36 %, com baixos percentuais de magnetita e oxidação generalizada dos minérios do Quadrilátero Ferrífero; a sílica é mais elevada nos granulados derivados das porções itabiríticas; a alumina é mais elevada nos produtos com associação a argilo-minerais, goethita e gibbsita; o fósforo é mais elevado na amostra de LOJGD, pela associação ao mineral wavellita e goethita; o manganês é elevado na amostra LOCPX, pelo proto-minério carbonatado; os teores médios de cálcio são baixos; o magnésio acompanha os altos teores de manganês na amostra LOCPX; os teores médios de titânio são baixos, apenas a amostra LOABO apresentou anomalia próxima à 0,100 %, provavelmente pela associação às rochas básicas; a perda ao fogo é mais elevada nos minérios mais alterados.

6.4 – Em termos percentuais, as tipologias predominantes são as compactas, exceto na amostra LOITAPIC, onde predominam tipologias itabiríticas. Em segundo plano aparecem as tipologias compactas porosas, seguidas pelas associadas à canga, porosas, itabiríticas e proto-minério, restrita à amostra de LOCPX. Em termos químicos, os

teores mais elevados de ferro total estão nas tipologias compactas, seguidas pelas compactas porosas, porosas, associadas à canga, proto-minério e itabiríticas, em ordem decrescente de valores. Os teores médios de FeO não apresentam variações significativas, mas na tipologia compacta do LOCPX, apresenta valor anômalo. Os teores de sílica são elevados nas tipologias itabiríticas, com teores acima de 3%. Os teores de alumina são mais elevados nas tipologias associadas à canga, itabiríticas e porosas, pelo efeito da alteração supergênica nesses tipos de minérios. A perda por calcinação (PPC) acompanha os teores de alumina, sendo os valores mais altos associados às tipologias associadas à canga e, secundariamente, nas tipologias porosas, proto-minério e itabiríticas. Os teores médios de manganês são baixos, mas na tipologia proto-minério e tipologias porosas do LOPIC, LOBPIC e LOITAPIC, os valores são anômalos, estando acima de 0,200%, atingindo até 2,80%. O cálcio está abaixo de 0,030%, mas na tipologia proto-minério o teor está em 0,080%. O magnésio é baixo, exceto no LOCPX onde acompanha os altos valores de manganês. O titânio é mais elevado nas tipologias associadas à canga e, secundariamente, nas tipologias porosas, itabiríticas e proto-minério, relacionado aos eventos genéticos de alteração supergênia. O fósforo é mais elevado nas tipologias associadas à canga, exceto na amostra LOJGD, onde a gênese hidrotermal confere ao minério os altos teores de fósforo.

6.5 – Em termos de índices metalúrgicos, o grau de metalização varia de 87,70 a 95,70%, sendo os valores menores associados aos produtos com alta contaminação de sílica, alumina e perda por calcinação. O percentual de finos gerados e liberação de enxofre variam de 4,10 a 13,50% e 7,70 a 75,40 ppm, respectivamente, sendo os valores maiores relacionados aos minérios mais alterados. A redutibilidade e RDI variam de 47,30 a 63,50% e 9,40 a 37,30, respectivamente, sendo os valores mais elevados também correlacionáveis aos minérios mais alterados. Os índices de crepitação nas frações <6,30 mm e <4,75 mm, apresentam resultados entre 0,80 a 6,60% e 0,50 a 5,10%, respectivamente, sendo uma variável metalúrgica inversamente proporcional ao aumento do grau de alteração dos granulados de minério de ferro. Os índices de tamboramento TI e AI, apresentam variações opostas, com valores entre 63,80 a 88,70% e 8,10 a 26,50%, respectivamente. Quanto maior os resultados de TI, menores os

valores de AI, sendo os minérios mais alterados os que apresentam os valores mais baixos de TI e os mais altos de AI.

6.6 – Para as correlações mais significativas entre os índices metalúrgicos (valor de coeficiente de correlação maior que 0,480, positivos ou negativos) pode-se afirmar que o grau de metalização e os índices de crepitação nas frações <4,75 e <6,30 mm são diretamente proporcionais (valores de 0,5901 e 0,5946, respectivamente), enfatizando que os produtos com alta crepitação, que é uma característica nociva nos processos de redução direta e alto-forno, perdem mais facilmente o oxigênio para o gás redutor (grau de metalização mais elevado), que se constitui em um importante diferencial de qualidade dos produtos. Os finos gerados e a liberação de enxofre são variáveis metalúrgicas diretamente proporcionais (valor de correlação de 0,7290), sendo a alteração maior dos minérios a causa fundamental. A correlação entre finos gerados com a redutibilidade e RDI também é positiva (valores de 0,6209 e 0,5030, respectivamente), tendo a fragilidade dos minérios pela alteração como a causa mais relevante. Os finos gerados com o índice de tamboramento são inversamente proporcionais (valor de -0,5854) e com o índice de abrasão ocorre o inverso (valor de correlação de 0,4940), sendo os minérios com menor geração de finos os que possuem maiores índices de tamboramento e menores índices de abrasão. A liberação de enxofre é diretamente proporcional à redutibilidade e RDI (valores de 0,6780 e 0,5757, respectivamente), sendo o aumento da alteração dos minérios, a principal causa das correlações positivas. A liberação de enxofre é inversamente proporcional aos índices de tamboramento (valor de -0,5616), pela maior fragilidade dos minérios com liberação de enxofre mais alta. Com relação ao índice de abrasão a liberação de enxofre é diretamente proporcional (valor de 0,5688), pois os minérios alterados têm maiores valores de liberação de enxofre e resistência mecânica menor. Os índices de redutibilidade têm uma forte correlação positiva com os índices de RDI (valor de 0,7350), tendo como causa fundamental o grau de alteração mais alto dos minérios, sendo que produtos com redutibilidade elevada, que é uma característica positiva, apresentam altos valores de RDI, que se constitui em um índice metalúrgico nocivo para redução direta e alto-forno. A redutibilidade é inversamente proporcional aos índices de tamboramento (valor de -0,5505) e diretamente proporcional aos índices de abrasão

(valor de 0,5984), mostrando que índices de redutibilidade mais elevados, não são condizentes com minérios com alta resistência mecânica, pois geram mais finos devido aos níveis mais altos de alteração. O RDI tem forte correlação negativa com os índices de tamboramento (valor de -0,8521) e uma forte correlação direta com os índices de abrasão (valor de 0,9202), sendo correlações importantes, pois os minérios com alta resistência mecânica apresentam degradação elevada quando submetidos à redução. Os dois índices de crepitação (frações <6,30 e <4,75 mm) apresentam uma forte correlação positiva, validando a metodologia para mensurar a variável (valor de 0,9929). Também existe uma forte correlação negativa entre os índices de tamboramento e abrasão (valor de -0,9509), mostrando que produtos granulados mais resistentes, com altos valores de tamboramento, apresentam baixos índices de abrasão e vice versa.

6.7 – Em termos de distribuição mineralógica nas tipologias, as considerações mais importantes são feitas a seguir. Nas tipologias compactas predominam as hematitas granulares e, secundariamente, hematitas lamelares, martitas e hematitas sinuosas. A hematita microcristalina foi identificada apenas na amostra LOCPX e os minerais goethita, gibbsita, quartzo e magnetita, aparecem em percentuais baixos na assembléia mineralógica compacta. A distribuição mineralógica nas tipologias compactas porosas é similar, apenas com aumento de hematitas lamelares e martitas e a conseqüente redução de hematitas granulares. Na amostra LOCPX CP, além do mineral micro cristalino, também foi descrita a jacobsita, de composição ferro manganesífera, magnético e relativamente raro nas formações ferríferas. Os percentuais de magnetita são um pouco mais elevados, com relação às tipologias compactas. Nas tipologias porosas ainda predominam as hematitas granulares, mas ocorre um aumento significativo das hematitas lamelares, martitas, goethitas e gibbsitas, relacionadas às mudanças genéticas provocadas pelo enriquecimento supergênico dessas tipologias. Nas tipologias com predomínio de canga, o principal mineral é a goethita e, secundariamente, martita, hematita lamelar, granular e percentuais mais elevados de gibbsita. O nível elevado de alteração dessas tipologias conduz a percentuais mais elevados de goethita e gibbsita. A magnetita ainda está presente na assembléia mineralógica, tendo permanecido como “relicto”, passando pelas fases de alteração. Os minerais martita, hematita lamelar e quartzo predominam nas tipologias itabiríticas e, secundariamente, hematita granular,

magnetita, goethita e gibbsita. A assembléia mineralógica das tipologias itabiríticas é coerente com estágios intermediários de oxidação e recristalização, com redução de hematita granular e sinuosa e aumento de martita. Na tipologia proto-minério predominam os minerais hematita lamelar e granular, mas a presença de hematita microcristalina é marcante nesta tipologia, decorrente de recristalização a temperaturas mais baixas. A gibbsita decorre da grande quantidade de minerais primários parcialmente alterados, com altos teores de alumina.

6.8 – O tamanho médio dos minerais está abaixo de 50 μm , exceto na tipologia proto-minério, onde tamanho dos cristais de quartzo atinge até 700 μm . Em termos de porosidade relativa, medida através da microscopia ótica, as tipologias mais porosas são as associadas à canga, porosas e proto-minério e, secundariamente, às tipologias itabiríticas e compactas porosas. As tipologias compactas apresentam a menor porosidade média. Quanto maior o estágio de alteração dos componentes tipológicos, maior o percentual de porosidade relativa. O tamanho médio dos poros é maior nas tipologias associadas à canga e proto-minério, valores intermediários nos minérios porosos e itabiríticos e tamanhos menores nas tipologias compactas e compactas porosas. Quanto maior a consistência dos minérios, menor o percentual e o tamanho médio dos poros e as tipologias compactas tem o menor percentual de poros e o menor tamanho médio dos mesmos.

6.9 – Dentre as principais correlações químicas, aplicadas à interpretação dos resultados metalúrgicos pode-se afirmar que o grau de metalização é diretamente proporcional ao teor de ferro total (valor de 0,5084) e inversamente proporcional às variáveis químicas alumina, perda ao fogo e sílica (valores de -0,7373, -0,4977 e -0,1559, respectivamente), demonstrando que os principais contaminantes químicos inibem a perda de oxigênio para o gás redutor. Em relação aos finos gerados as principais correlações químicas são: o teor de ferro total é inversamente proporcional aos finos gerados (valor de -0,1327), denotando que quanto maior o teor de ferro, menor a geração de finos no processo de redução direta e vice-versa. A sílica é diretamente proporcional aos finos gerados (valor de 0,1204), demonstrando que produtos granulados mais silicosos geram mais finos. A alumina tem um baixo coeficiente

negativo de correlação com os finos gerados (valor de -0,1204) e a perda ao fogo é diretamente proporcional (valor de 0,2809). Os resultados da perda ao fogo estão coerentes, pois quanto maior a alteração e presença de argilo-minerais, menor a resistência do produto, aumentando a geração de finos. A alumina deveria acompanhar a perda ao fogo, pois é mais abundante nos minérios mais alterados, com menor resistência. A liberação de enxofre com ferro total é inversamente proporcional (valor de -0,4995), devido à alteração pronunciada dos minérios com liberação de enxofre mais alta. As variáveis químicas sílica, alumina e perda ao fogo se comportam como diretamente proporcionais à liberação de enxofre (valores de 0,4175, 0,1970 e 0,6084, respectivamente), demonstrando que quanto mais elevados os teores dos compostos químicos contaminantes, maiores os valores de liberação de enxofre. A redutibilidade é inversamente proporcional aos teores de ferro total (valor de -0,4410), significando que quanto maior os teores de ferro total, a redução do oxigênio é menor. A correlação entre redutibilidade e sílica é diretamente proporcional (valor de 0,6023), indicando que minérios mais silicosos apresentam índices de redutibilidade mais elevados. Os teores de alumina são inversamente proporcionais à redutibilidade (valor de -0,2225), enquanto a perda ao fogo é diretamente proporcional (valor de 0,3857), sendo um indicador positivo de aumento da redutibilidade. O RDI varia de forma inversa aos teores de ferro total (valor de -0,7339), sendo os minérios mais ricos em ferro os que apresentam degradação menor. A sílica e perda ao fogo apresentam correlação positiva (valores de 0,7950 e 0,7754, respectivamente), sendo a elevação de sílica e níveis elevados de alteração, fatores importantes de geração de finos na redução. A correlação do RDI com alumina é baixa (valor de -0,0265), sendo a perda ao fogo mais representativa e coerente nesta avaliação. As correlações entre crepitação (frações <4,75 e <6,30 mm) e ferro total são fortemente positivas (valores de 0,7188 e 0,7386, respectivamente), sendo que quanto maiores os teores de ferro, maiores os índices de crepitação, interferindo negativamente no processo siderúrgico. Quanto mais elevados os teores de sílica, menores os índices de crepitação nas frações <4,75 e <6,30 mm, com coeficientes de correlações negativos (valores de -0,4189 -0,4361, respectivamente), sendo que os minérios mais silicosos tem valores menores de crepitação. Os teores de alumina e perda ao fogo também são inversamente proporcionais aos índices de crepitação, com coeficientes de correlações negativos nas frações <4,75 e <6,30 mm

(alumina: -0,7373 e -0,7403, respectivamente; perda ao fogo:-0,7230 e -0,7547, respectivamente). A alumina e perda ao fogo demonstram o mesmo comportamento em relação à crepitação, induzindo que minérios mais alterados e hidratados, com maior percentual de argilo-minerais tendem a valores menores de crepitação. Os índices de tamboramento e abrasão apresentam comportamentos opostos em relação às principais variáveis químicas, exceto na alumina. O índice de tamboramento apresenta correlação positiva em relação ao ferro total (valor de 0,5340) e o índice de abrasão tem correlação negativa (valor de -0,6398), concluindo que minérios com altos teores de ferro têm maior resistência mecânica e geram menos finos no manuseio e transporte e vice-versa. As correlações do tamboramento com sílica são negativas (valor de -0,5069) e as correlações de abrasão com sílica são positivas (valor de 0,6558), confirmando que os minérios mais silicosos possuem menor resistência e geram mais finos durante o manuseio. As correlações do tamboramento e abrasão com alumina é muito baixa e negativa (valores de -0,0245 e -0,0424), mostrando que esta variável não é indicativa para avaliar a resistência mecânica dos produtos granulados. Por outro lado a correlação do tamboramento com a perda ao fogo é inversamente proporcional (valor de -0,7032) e da abrasão com a perda ao fogo é positiva (valor de 0,7949). Os produtos granulados com minerais hidratados e com argilo-minerais possuem menor resistência, geram mais finos no manuseio e transporte e derivam de minérios submetidos à alteração mais pronunciada.

6.10 – A descrição tipológica, com separação das principais tipologias, pesagem e quantificação dos percentuais, pode ser utilizada como avaliação preliminar do comportamento metalúrgico dos produtos granulados de minério de ferro. Maiores percentuais das tipologias compactas e compactas porosas elevam o grau de metalização, índices de crepitação e tamboramento, pelo baixo percentual de contaminantes, altos teores de ferro, baixa porosidade relativa e alta resistência mecânica ao manuseio e transporte. Menores percentuais de tipologias compactas e compactas porosas elevam os índices de finos gerados, liberação de enxofre, redutibilidade, RDI e índice de abrasão. O quantitativo da tipologia hematita porosa é diretamente proporcional aos finos gerados, liberação de enxofre, redutibilidade, RDI e abrasão, pois a gênese está associada a minérios mais intemperizados. A tipologia

porosa é inversamente proporcional ao grau de metalização, índices de crepitação e tamboramento. As tipologias associadas à canga, itabiríticas e proto-minério apresentam o mesmo comportamento das porosas, pois derivam de minérios alterados em diferentes estágios, com maior porosidade e permeabilidade, com graus de consistência média a macia.

6.11 – São colocadas a seguir as principais conclusões sobre as correlações entre os principais minerais, porosidade relativa e os índices metalúrgicos. As hematitas granulares e sinuosas apresentam uma correlação diretamente proporcional com relação ao grau de metalização, índices de crepitação e tamboramento e são inversamente proporcionais aos finos gerados, liberação de enxofre, redutibilidade, RDI e abrasão. Estes dois minerais estão relacionados a baixos níveis de alteração e alto grau de cristalização, sendo pouco porosos e com resistência mecânica mais pronunciada. As hematitas lamelares e goethitas apresentam correlações positivas com os finos gerados, liberação de enxofre, redutibilidade, RDI e abrasão, apresentando correlações inversas em relação ao grau de metalização, crepitação e tamboramento. A martita apresenta um comportamento similar à hematita lamelar e goethita, exceto com relação aos finos gerados, onde apresenta correlação negativa. A martita, hematita lamelar e goethita são minerais mais frágeis, porosos, permeáveis, quando relacionados à hematita granular e sinuosa, refletindo em correlações diferenciadas. A porosidade relativa é diretamente proporcional à liberação de enxofre e índice de tamboramento e quanto às outras variáveis metalúrgicas, os resultados são inversamente proporcionais.

6.12 – São discutidas a seguir as principais conclusões físicas, químicas e mineralógicas do estudo dos finos gerados pelos ensaios de tamboramento (frações entre 6,30 e 1,00 mm e <1,00 mm). O percentual granulométrico na fração <6,30 >1,00 mm é de 66,34%, enquanto na fração <1,00 mm o percentual é de 33,66%. Os teores de ferro total são de 66,00% na fração <6,30 >1,00 mm e 62,79% na fração <1,00 mm, enquanto a média dos teores de FeO nas duas frações são similares (0,32 % e 0,34%, respectivamente). A sílica média na fração <6,30 >1,00 mm é de 1,94% e na fração <1,00 mm é de 4,29%, com teores mais elevados nos granulados onde a contribuição itabirítica foi maior. A alumina média na fração <6,30 >1,00 mm é de 1,11% e 2,07% na fração <1,00 mm,

sendo que a perda ao fogo acompanha os teores de alumina nas frações (1,86% e 2,56%, respectivamente). Em termos de distribuição mineralógica, os percentuais de goethita, gibbsita e quartzo nas frações <6,30 >1,00 mm são de 8,16%, 2,01% e 2,40%, enquanto na fração <1,00 mm, os percentuais são mais elevados (10,11%, 3,09% e 4,25%, respectivamente). Os minerais hidratados e quartzo fino são os responsáveis pela formação de uma “matriz” que atua como aglomerante nos fragmentos maiores e causa dificuldades de manuseio e transporte dos produtos granulados de minério de ferro.

6.13 – Os produtos granulados derivados de minério de ferro são produzidos apenas por britagem e peneiramento. Pelos resultados químicos, tipológicos, mineralógicos e metalúrgicos das onze amostras estudadas, representando produtos destinados para processos metalúrgicos de redução direta e alto-forno, não foi determinado um tipo de minério ideal, que atende a todas as características metalúrgicas, que é o tema central do trabalho. Seguem alguns exemplos gerais: os produtos com alto teor de ferro apresentam alto grau de metalização, baixos valores de geração de finos e liberação de enxofre, índice de tamboramento elevado, RDI baixo, mas a redutibilidade é baixa e a crepitação é elevada; os produtos granulados com contribuição de minérios mais alterados apresentam menor resistência mecânica, menor grau de metalização, mas a redutibilidade é mais alta e a crepitação é mais baixa, quando comparados aos produtos com teores de ferro mais elevados e com predomínio de tipologias compactas e compactas porosas; a mineralogia também tem um papel importante no desempenho metalúrgico e com o aprofundamento do conhecimento, poderá adicionar ganhos diferenciais importantes na metalurgia dos granulados. É muito importante adaptar os produtos aos processos siderúrgicos, através de misturas controladas, buscando otimizar os quantitativos disponíveis dos produtos, qualidade química, física, granulométrica, tipológica, metalúrgica e mineralógica, visando ganhos de produtividade e melhorias nos padrões de qualidade na indústria siderúrgica do minério de ferro.

7 – CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO

As principais contribuições ao conhecimento científico sobre minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero estão relacionadas à ampliação do estudo das correlações físicas, químicas, tipológicas e mineralógicas aplicadas à compreensão das principais variáveis metalúrgicas dos produtos granulados de minério de ferro.

As principais variáveis químicas são correlacionáveis aos índices metalúrgicos, bem como os principais minerais que fazem parte da assembléia mineralógica das minas amostradas.

O estudo dos principais litotipos também pode ser utilizado como uma avaliação preliminar em termos de previsibilidade do comportamento metalúrgico dos granulados de minério de ferro, sendo complementado pelas análises químicas, mineralógicas e metalúrgicas, obtidas por análises de laboratório, microscopia ótica e ensaios metalúrgicos padronizados.

As correlações mineralógicas e metalúrgicas objetivaram aumentar o nível de conhecimento da microscopia direcionada para o comportamento metalúrgico dos granulados de minério de ferro, visando iniciar um estudo que poderá agregar conhecimentos importantes para a indústria do minério de ferro.

A avaliação dos finos gerados nos ensaios de tamboramento representa um estudo prático aplicado a um problema comercial de manuseio e transporte dos granulados.

8 – RELEVÂNCIAS DOS RESULTADOS OBTIDOS

A indústria mundial do minério de ferro tem crescido fortemente na última década, sendo os produtos brasileiros considerados como reguladores de qualidade na siderurgia. Os produtos granulados produzidos no Sistema Sul da Vale, utilizando apenas britagem e peneiramento, ocupam uma posição importante nos derivados com alto valor agregado, aproximando-se das pelotas para redução direta e alto-forno. Torna-se relevante a ampliação do conhecimento das características físicas, químicas, metalúrgicas e mineralógicas dos produtos granulados, sendo utilizado como diferencial qualitativo no mercado globalizado.

Os estudos levam a uma melhor compreensão genética das jazidas, revestindo-se de suma importância na busca de alternativas que objetivam uma melhor previsibilidade dos produtos gerados e o conseqüente aumento da demanda de trabalhos geológicos direcionados para ampliar o conhecimento da gênese dos minérios.

9 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros podem ser direcionados para os seguintes estudos principais: ampliar o conhecimento das correlações químicas, tipológicas e mineralógicas com os resultados metalúrgicos; estudar os domínios geometalúrgicos nas minas, objetivando a produção diferenciada de produtos para redução direta e alto-forno; efetuar estudos de misturas de diferentes produtos granulados objetivando ganhos de produtividade e qualidade na indústria metalúrgica nos processos de redução direta e alto-forno; estudos de viabilidade de produtos considerados fora de especificação em termos químicos, físicos e metalúrgicos, através da mistura controlada com produtos mais nobres, principalmente pela tendência mundial de redução da oferta de produtos granulados; priorizar estudos de misturas de produtos que provoquem impactos positivos nas propriedades metalúrgicas consideradas fundamentais nos processos de redução direta e alto-forno e ampliando a oferta de diferentes produtos no mercado; efetuar estudos de correlações para os produtos mais finos, como sinter feed e pellet feed.

Os estudos detalhados de elementos químicos menores poderão fornecer informações valiosas para ampliar a compreensão genética das diferentes jazidas de minério de ferro. Ampliar os estudos das hematitas micro cristalinas e também da jacobsita, que se trata de um mineral raro nas Formações Ferríferas mundiais.

Uma extensão dos estudos mineralógicos e da porosidade com a utilização da microscopia eletrônica, ampliaria o conhecimento das correlações com as variáveis metalúrgicas, visando aplicações práticas na siderurgia, principalmente nos ganhos de produtividade na indústria siderúrgica e significativos acréscimos na qualidade final dos produtos derivados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 3082; Minérios de ferro – Procedimentos de amostragem e preparação de amostras. Rio de Janeiro. 29-09-2003. 56 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 4701; Minérios de ferro – Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro. 29-11-2004. 40 p.

ALMEIDA, F. F. M. (1977). O Cráton de São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4): 349-364.

ALKMIM, F. F., MARSHAK S., (1998). Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic Collision and Collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90:29-58.

BABINSKY, M., CHEMALE JR. F., VAN SCHMUS W.R. (1995). The Pb/Pb Age of Minas Supergroup Carbonate Rocks, Quadrilátero Ferrífero, *Precambrian Research* 72:235-245.

BARLEY, M. E., PICKARD, A. L., HAGEMANN, S. G., FLOKERT, S. L., (1999). Hydrothermal Origin for the 2 Billion Year Old Mount Tom Price Giant Iron Ore Deposit, Hamersley Province. Western Australia – *Mineralium Deposita*, vol 34, pp. 784-789.

BEUKES, N. J., GUTZMER, J., MUKHOPADHYAY, J., (2002). The Geology and Genesis of High Grade Hematite Iron Ore Deposits – Iron Ore Conference – The Australasian Institute of Mining and Metallurgy – Perth – W. A., pp. 23-29.

BIZZI, L. A., SHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R.M., GONÇALVES, J. H., (2003). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Texto, mapas e SIG.

BRANDÃO, P. R. G., SANTOS, L. D., (1987). Caracterização Mineralógica dos Minérios Granulados da Mina do Pico. Fundação Christiano Ottoni, Relatório Interno da MBR. Belo Horizonte, MG. 33 p.

CASTRO, L. F. A., TAVARES, R. P., (2006). Minério de Ferro – Processos de Obtenção e sua Utilização na Siderurgia (coordenação: Armando Corrêa Araújo). ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Programa de Educação Continuada, Cursos ABM Belo Horizonte:ABM, Câmara Brasileira do Livro, 2006. 35 p.

CHAUVET, A., FAURE, M., DOSSIN, I., CHARVET, J. (1994). A Three-Stage Structural Evolution of the Quadrilátero Ferrífero: Consequences for the Neoproterozoic Age and Formation of Gold Concentration of the Ouro Preto Area, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 65:25-54.

CHEMALE, JR. F., ROSIÈRE C. A., ENDO, I. (1994). The Tectonic Evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 65:25-54.

CLARCK, D. A., SCHMIDT, P. W., (1986). Magnetic Properties of the Banded Iron Formations of the Hamersley Group, W. A. CSIRO Division of Mineral Physics: North Ryde (unpublished AMIRA report 1638).

DORR II, J.V.N. (1969). Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero. Minas Gerais, Brazil. USGS Professional Paper, Washington, 641-A, p. A₁-A₁₀₃.

DORR II, J. V. N. (1964). Supergene Iron Ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 59 (7):1203-1240.

DORR II, J. V. N. (1965). Nature and Origin of High-Grade Hematite Ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 60 (1):1-46.

DORR II, J. V. N. (1973). Iron-Formation in South America. *Economic Geology*, 68: 1005-1022.

DUKINO, R. D., SWAIN, M. V., LOO, C. E. (1999). A Simple Contact and Fracture Mechanics Approach to Tumble Drum Breakage. *International Journal of Mineral Processing*. Wallsend, Austrália. 59 (2000), pp 175 – 183.

EICHLER, J. (1967). O Enriquecimento Residual e Supergênico dos Itabiritos Através do Intemperismo. *Geologia*, 1:29-40.

EICHLER, J., (1976). Origin of the Precambrian Banded Iron-Formations. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 157-201.

FAGERBERG, B., SANDBERG, N. (1973). Minerals Transport. In: Proc. 2nd Int. Symp. Transport and Handling of Materials, vol. 2, pp 128-155.

FERNANDES, E. Z., (2003). Aplicação da Caracterização Tipológica ao Planejamento de Lavra de Minério de Ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2003. 130 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

GIBBS, A. K., WIRTH, K. R., (1990). Geologic Setting of the Serra dos Carajás Iron Deposits, Brazil – Ancient Banded Iron Formations – Theophrastus Publications, S. A. Greece: pp. 83-102.

GUEDES, S. C., ROSIÈRE, C. A., BARLEY, M., LOBATO, M., (2002). Carbonate Alteration Associated with the Carajás High Grade Hematite Deposits, Brazil – Iron Ore Conference – The Australasian Institute of Mining and Metallurgy – Perth – W. A., pp. 63-66.

GUERRA, R. (2005). Procedimentos internos padronizados de análises químicas via úmida no Laboratório Químico da CVRD, Sistema Sul. Itabirito, MG.

HARMSWORTH, R. A., KNEESHAW, W. M., MORRIS, R. C., ROBINSON, C. J. and SRIVASTAVA, P. K. (1990). BIF – Derived Iron Ores of Hamersley Province. Geology of the Mineral Deposits of Austrália and Papua New Guinea, p. 617-642.

HEFFERNAN, V. (2004). Baffin Island's rich iron deposits attractive again. Project prized for lump ore potential. North America's Mining Newspaper, Toronto, Ontario, Canadá. Vol. 90, nº 26.

HERZ, N. (1978). Metamorphic Rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS Professional Paper, Washington, 641-C, p. C₁-C₈₁.

HIDA, Y. (2000). Properties of MBR BFLO. Estudo conjunto entre MBR e Nippon Steel Technoresearch Corp. Relatório técnico interno da MBR. Nova Lima, MG. 61 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, Genève, Switzerland. ISO 11257:1998 (E). Iron Ores – Determination of disintegration and metallization of feedstock for direct reduction by gas reforming processes. Genève, Switzerland. 1998 – 07 – 01. 12 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, Genève, Switzerland. ISO N 170 E:1996. Iron Ores – Determination of sulphur released under reduction by hydrogen. Genève, Switzerland. 1996 – 05 – 23. 06 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, Genève, Switzerland. ISO 4696-2:1998 (E). Iron Ores – Static test for low-temperature reduction-disintegration. Genève, Switzerland. 1998 – 08 – 01. 13 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, Genève, Switzerland. ISO 7215:1995 (E). Iron Ores – Determination of relative reducibility. Genève, Switzerland. 1995 – 11 – 15. 11 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, Genève, Switzerland. ISO 8371:1994 (E). Iron Ores – Determination of decrepitation index. Genève, Switzerland. 1994 – 11 – 15. 05 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, Genève, Switzerland. ISO 3271:1995 (E). Iron Ores – Determination of tumble strength. Genève, Switzerland. 1995 – 11 – 01. 08 p.

LADEIRA, E. A., VIVEIROS, J. F. M. (1984). Hipótese Sobre a Estruturação do Quadrilátero Ferrífero com Base nos Dados Disponíveis. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia de Minas Gerais, 4, 14p.

LAGOEIRO, L. E. (1998). Transformation of Magnetite to Hematite and its Influence on Dissolution of Iron Oxide Minerals. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 415-423.

LAGOEIRO, L. E., ROMANO, R. C., VENTURINI, P. N., PEREIRA, M. C., GOMES Jr, A. A. S. (2004). Mineralogy of the Iron Formation in the Itabira Mines, Iron Quadrangle, Brazil. *Applied Mineralogy*, Pecchio et al. (eds) 2004 ICAM-BR, São Paulo, ISBN 85-98656-02-X. Pp. 885-887.

LAGOEIRO, L. A., VENTURINI, P. N., ROMANO, R., ENDO, I. (2004). Iron Ore Mineralogy of Paleoproterozoic Iron Formations from Iron Quadrangle, Brazil. *Applied Mineralogy*, Pecchio et al. (eds) 2004 ICAM-BR, São Paulo, ISBN 85-98656-02-X. Pp. 889-892.

LEMOS, M. R. C., AZEVEDO, M. A., LEITE, S. M. F., MARÇAL, T. E. (1978). Avaliação Técnica de Matérias-primas para Sinterização e Alto-forno. In: XXXIII Congresso Anual da ABM, São Paulo, SP. Julho de 1978.

MARSHAK, S., ALKMIM, F. F. (1989). Proterozoic Contraction/Extension Tectonics of the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8(3):555- 571.

MARSHAK, S., ALKMIM, F. F., JORDT-EVANGELISTA H. (1992). Proterozoic Crustal Extension and Generation of Domo-and-Keel Structure in the Archean Granite-Greestone Terrane. *Nature*. 357:491:493.

MELFI, A. J., PEDRO, G., NALOVIC, L., QUEROZ NETO, J. P. (1976). Etude Sur L'altération Géochimique des itabirites du Brésil. *Cah. ORSTOM, Ser. Pédologie*, XIV, 3:179-192.

MORRIS, R. C. (1985). Gênese of Iron Ore in Iron-Formation by Supergene and Supergene-metamorphic Processes – A conceptual model. In: Wolf, K. H. (ed). *Handbook of stratabound and stratiform ore deposits*. Amsterdam. Elsevier, 13, 73-235.

NOCE, C. M. (1995). Geocronologia dos Eventos Magmáticos, Sedimentares e metamórficos na Região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Instituto de Geociências, São Paulo, Tese de Doutorado, 128 p.

NORGATE, T.E., TOMPSITT, W.J., BATTERHAM, R. J. (1986). Computer Simulation of the Degradation of Lump Ore During Transportation and Handling. In: *Proc., 2nd Int. Conf. on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation*, Wollongong.

NOSAKA, N. (1999). Mineralogical Properties of Small Particles Sampled at Abóboras Deposita and Sapecado Mine of MBR. Relatório técnico interno da MBR. Nova Lima, MG. 42 p.

PARK, C. F.JR., (1959). Origin of Hard Hematite in Itabirite. *Econ. Geol.*, 54, 573-587.

PIMENTA, H. P. (1989). Ensaio de qualidade da carga metálica e coque para alto-forno, Usiminas, Ipatinga, MG.

PIRES, F. R. M. (1995). Textural and Mineralogical Variation During Metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 67 (1):77-105.

PIRES, F. R. M., CARVALHO, T. S., COSTA, M. T. (1998). Origin of the Compact Hematite Deposits at Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geol. Soc. América, Abs.*, 1998 Annual Meeting, Toronto, p. 368.

PIRES, F. R. M., FROST, B. R. (2004). Parageneses Generated by the Oxidation during Metamorphism of the Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Pp. 927-930. Disponível em: < http://www.icam2004.org/upload/Pap_0330.pdf >. Acesso em: 30 abr. 2006.

POMERENE, J. B. (1964). Geology and Mineral Deposits of the Belo Horizonte, Ibirité e Macacos Quadrangles, USGS Prof. Paper 341-D, p. 1-84.

POWELL, C. McA., OLIVER, N. H. S., LI, Z. X., MARTIN, D. McB., RONASZEKI, J., (1999). Synorogenic Hydrothermal Origin for Giant Hamersley Iron Oxide Ore Bodies. *Geology* 27, pp. 175-178.

QUARESMA, L.F., (2001). Balanço Mineral Brasileiro 2001 – Ferro. Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília, DF, pp 1-27.

RAMANAIDOU, E. (1989). Gênese d'un Gisement Latéritique. Evolution Supergéne des Itabirites Protérozoïque de la Mine de Fer de Capanema, Minas Gerais, Brésil. Université de Poitiers, U. F. R. Sciences Fondamentales et Appliquées, These de Docteur, 183 p.

RAMANAIDOU, E., NAHON, D., DECARREAU, A. MELFI, A. J. (1996). Hematite and Goethite from Duricrusts Developed by Lateritic Chemical Weathering of Precambrian Banded Iron Formations, Minas Gerais, Brazil. *Clays and Clay Minerals*, 44(1):22-31.

RENGER, F. E., NOCE, C. M., ROMANO, A. W., MACHADO, N. (1994). Evolução Sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 2(1):1-11.

RIBEIRO, D. T., ZAVAGLIA, G. (1998). Bacias Terciárias e Enriquecimento de Minério de Ferro. In: SBG/Núcleo de Minas Gerais, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 9, Belo Horizonte, Anais, 14:139-140.

RIBEIRO, D. T. (2003). Enriquecimento Supergênico de Formações Ferríferas Bandadas: Estruturas de Colapso e Desordem. Instituto de Geociências da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UFRJ, Tese de Doutorado, 123 p.

ROSIÈRE, C. A., SIEMENS, H., QUADE, H., BROKMEIER, H. G., JANSEN, E. M. (2001). Microstructures, Textures and Deformation Mechanisms in Hematite, *Journal of Structural Geology*, 23:1429-1440.

ROSIÈRE, C. A., CHEMALE JR. F., GUIMARÃES, M. L. V. (1993). Um Modelo para a Evolução Microestrutural dos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I- Estruturas e Recristalização. *Revista Geonomos*, 1(1):65-84, UFMG, Belo Horizonte, MG.

ROSIÈRE, C. A., QUADE, H., SIEMENS, H., CHEMALE JR, F., SOUZA, E. M. R. (1998). Um Modelo para a Evolução Microestrutural dos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero, Parte II – Trama, Textura e Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. *Revista Geonomos*, 4 (1): 61-75, UFMG, Belo Horizonte, MG.

ROSIÈRE, C. A. (2000). Itabiritos e Minérios de Ferro de Alto Teor do Quadrilátero Ferrífero – uma Visão Geral e Discussão, Anais, 173-1986.

ROSIÈRE, C. A. (1981). Strukturelle und Texturelle Untersuchungen in der Eisenerzlagstätte “Pico de Itabira” Bei Itabirito/Minas Gerais, Brasilien. Claust. Geowiss. Dissertação de Doutorado, 9:1-302.

ROSIÈRE, C. A., RIOS, F. J. (2002). The Origin of Hematite in High Grade Iron Ore Based on Infrared Microscopy and Fluid Inclusions Studies: the Example of the Conceição Mine, QF, Brazil. Economic Geology.

ROSIÈRE, C. A., (1983). A Recristalização do Minério de Ferro da Jazida do Pico de Itabirito no Quadrilátero Ferrífero, MG e suas Implicações Genéticas. In: Anais do II Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, pp. 173-186.

SILVA, R. R. R., AMARANTE, C. C., SOUZA, C. C., ARAUJO, A. C. (2002). Ore Mineralogy and its Relevance for the Selection of Concentration Methods in the Processing of Brazilian Iron Ores. In: Iron Ore Conference, Perth, WA, 9 – 11 september, 2002, 11 p.

SCHMIDT, P. W., CLARCK, D. A., (1994). Paleomagnetism and Magnetic Anisotropy of Proterozoic Banded-Iron Formations and Iron Ores of the Hamersley Basin. Western Australia. Precamb. Res. 69: 133-155.

SOUZA, C. C., ALMEIDA, R.M., PEREIRA, J. F., (1998). Histórico das propriedades físico-metalúrgicas do LO alto-forno da MBR. Relatório técnico interno. Nova Lima, MG. 24 p.

TAYLOR, D., DALSTRA, H. J., HARDING, A. E., BROADBENT, G. C., BARLEY, M. E., (2001). Genesis of High-Grade Orebodies of the Hamersley Province, Western Australia. Centre for Strategic Mineral Deposits, Department of Geology and Geophysics. The University of Western Australia, Nedlands, Western Australia 6906. *Economic Geology*, vol. 96, pp. 837-873.

TEO, C. S., WATERS, A. G., NICOL, S. K. (2003). Quantification of breakage of lump materials during handling operations. BHP Central Research Laboratories, Vale Street, Shortland, N. S. W. 2307, Australia.

THORNE, W. S., HAGEMANN, S. G., BARLEY, M. (2004). Petrographic and geochemical Evidence for Hydrothermal Evolution of the North Deposit, Mt Tom Price, Western Australia. *Mineralium Deposita, International Journal for Geology, Mineralogy and Geochemistry of Mineral Deposits*. Springer-Verlag, 2004. 23 p.

VAN SCHALKWYK, J. F. and BEUKES, N. J., (1986). The Sishen Iron Ore Deposit, Griqualand west – *Mineral Deposits of Southern Africa, Vol I&II*, pp. 931-956.

VARAJÃO, C. A. C., RAMANAIDU, E., COLIN, F., NAHON, D. (1997). Gênese dos Corpos de Hematita Compacta (“Hard Hematite Ores”): Metassomatismo, Sedimentação ou Alteração Supergênica ? Ouro Preto, Minas Gerais. *Revista Escola de Minas de Ouro Preto, MG*, 50 (1): pp. 40-43.

VICENTINO, C., (1998). Eras Geológicas da Terra. *Enciclopédia Barsa*, vol. 4, pp 250-271. *História Memória Viva*, Editora Scipione, 2002.

VIEIRA, C. B., ROSIÈRE, C. A., SESHADRI, V., ASSIS, P. S., COELHO, L. H., PENA, H. Q. (1999). Geometallurgical Approach for Quality Control of Iron Ores for Agglomeration in Iron Ore and Steel Industry. In: *International Symposium on Beneficiation, Agglomeration and Environment – ISBAN 99*, Bhubaneswar, India, 20-22 January, 1999. 8 p.

VIEL, R. S., MOREIRA, P. C. H. , ALKMIM, F. F. (1987). Faciologia da Formação Cauê e Gênese do Minério de Ferro Friável da Mina de Águas Claras, Serra do Curral – Minas Gerais. In: SBG/Núcleo Minas Gerais, Simpósio sobre Sistemas Deposicionais no Pré-cambriano, Ouro Preto, Anais, 137-153.

WALLACE, R. M. (1965). Geology and Mineral Resources of the Pico do Itabirito District, Minas Gerais, Brazil. U. S. Geol. Survey Prof. Paper 341-F, 68 p.

WEEDON, D. M., WILSON, F. (1999). Modelling iron ore degradation using a twin pendulum breakage device. International Journal of Mineral Processing, Elsevier, 59 (2000), pp. 195-213, 10-01-1999.

WIRTH, K. R., GIBBS, A. K., OLSZEWSKI JR., W. J. (1986). U Pb Zircon Ages of the Grão Pará Group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. Ver. Brás. Geoc., vol. 16, número 2, pp. 195-200.

<http://www.stratigraphy.org/cheu.pdf/abril2008> - International stratigraphic chart. Acessado em 09/04/2008, às 8:00 h.

<http://www.midrex.com/> - Acessado em 20/06/2008, às 9:00 hs.

Anexo 1

Procedimentos internos de laboratório para análises químicas via úmida:

Serão descritos a seguir, alguns procedimentos padronizados utilizados na rotina do laboratório de análises químicas da MBR, referente ao método de análise por “via úmida”, sendo de fundamental importância na interpretação dos resultados (Guerra, 2005).

Determinar o teor de Ferro Total

Método Cloreto de Titânio (TiCl₃)

Reagentes e soluções :

- 1 - Ácido Clorídrico (HCl), d= 1,19 g/ml
- 2 - Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) d = 1,84 g/ml
- 3 - Ácido Fosfórico (H₃PO₄) d= 1,71 g/ml
- 4 - Mistura ácida (H₃PO₄ + H₂SO₄ + Difenilamina Sulfonato de Sódio)

Pesar 0,07g de Difenilamina Sulfonato de Sódio(C₆H₅NHC₆H₄SO₃Na) dissolver em 700 ml de água no próprio frasco da solução, adicionar lentamente, sob resfriamento em água corrente, 150 ml H₃PO_{4conc}. Adicionar 150 ml de H₂SO_{4 conc}. Resfriar e homogeneizar.

- 5 - Cloreto de Estanho II (SnCl₂.H₂O), 100 g/l

Transferir 100 g de SnCl₂ para bécker de 1000 ml. Adicionar 200 ml de HCl, agitar a solução até completa dissolução. Completar o volume com H₂O destilada para 1000 mL . Esta solução deverá ser armazenada em frasco escuro.

- 6 - Dicromato de Potássio (K₂Cr₂O₇), 0,1N .

Transferir 4,9035 g de dicromato de potássio, previamente seco em estufa a 105°C +/- 5°C por 2 horas e resfriado em dessecador até temperatura ambiente, para balão volumétrico aferido de 1000 ml, dissolver em água, completar o volume, aferir e homogeneizar, (anotar a temperatura da sala).

7 - Dicromato de Potássio ($K_2Cr_2O_7$) 1,0g/l.

8 - Índigo de Carmin (1,0g/1000ml)

Dissolver 1,0 g de índigo de carmin em 1000 ml de água destilada. Esta solução é muito instável por isso ela deve ser preparada na quantidade suficiente para o uso, podendo ser usada em até uma semana.

9 - Cloreto de Titânio III, ($TiCl_3$)

Diluir 100 ml de $TiCl_3$ em 900 ml de HCl 1+1. Preparar a quantidade suficiente para uso desta solução, podendo ser usada em até uma semana.

10 - Permanganato de Potássio ($KMnO_4$), 25 g/l

11 – Água Oxigenada (H_2O_2) 3 %

OBS: Foram feitas algumas adaptações da Norma para facilitar a rotina no Laboratório:
São elas :

-Dicromato de Potássio:

- internamente optamos por fazer a solução a uma concentração de 1,0g/l para minimizar o volume desta solução a ser adicionado na amostra e não 0,5g/l.

- alteramos a faixa da temperatura de secagem do sal de 140°C a 150°C para 105°C .

- Difenilamina Sulfonato de Sódio: Optamos por usa-la junta à Mistura Ácida.

Procedimento

1 - Pesar aproximadamente 0,4000 g de amostra, levar para erlenmeyer de 500 ml. Umidecer, adicionar algumas gotas de SnCl_2 e 20 ml de HCl_{conc} . Tampar com vidro de relógio, levar a chapa elétrica à $\pm 80^\circ\text{C}$ por 1 hora até completa solubilização.



Figura 1 – Processo de solubilização do ferro na chapa.

2 - Diluir para +/- 100 ml com H_2O fervente. Adicionar SnCl_2 para reduzir o Fe (III) agitando a solução no erlenmeyer até que permaneça somente uma cor amarelo pálido .



Figura 2 – Redução do ferro com cloreto estanoso.

Obs: Se durante a redução com SnCl_2 a amostra ficar incolor (excesso de SnCl_2), adicionar gotas de KMnO_4 ou de H_2O_2 para eliminar este excesso, até a solução mudar a cor para amarelo claro.

3 - Adicionar de 3 a 4 gotas de Índigo de Carmin , continuar a redução gota a gota sob agitação com TiCl_3 até que se torne azul e depois incolor. Acrescentar 2 gotas de TiCl_3 em excesso. Adicionar $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (1,0 g/l) gota a gota para oxidar o excesso de TiCl_3 até ficar com coloração azul por +/- 5 segundos.



Figura 3 – Oxidação do excesso de $TiCl_3$.

OBS: A temperatura da solução neste momento deve ser maior que $70^{\circ}C$. Se a temperatura estiver entre $60^{\circ}C$ e $70^{\circ}C$, recomenda-se que a permanência da cor azul seja estendida por até 15 segundos.

4 - Esfriar em água corrente por +/- 10 minutos. Diluir para +/- 300 ml com H_2O destilada fria. Agitar. Verificar se a amostra ficou com a cor característica do índigo de carmin (azul) , se não estiver adicionar gotas de $K_2Cr_2O_7$ (1,0 g/l) até permanecer a cor azul. sob constante agitação.



Figura 4 – Verificação da coloração ideal para titulação (azul).

5 - Adicionar 30 ml de mistura ácida (H_2SO_4 + H_3PO_4 + difenilamina sulfonato de sódio) titular com dicromato de potássio 0,1 N até a mudança da cor verde para violeta.



Figura 5 – Titulação com a mudança de coloração do azul para violeta.

Cálculo:

$$\% \text{ Fe Total} = \frac{V_a \cdot [1 - (T_2 - T_1) \cdot 0,0002] \cdot F \text{ correção} \cdot F \text{ esteq.}}{M_a}$$

$$F \text{ correção} = \frac{\% \text{ Ferro padrão} \cdot M \text{ pad}}{V \text{ pad} \cdot [1 - (T_2 - T_1) \cdot 0,0002] \cdot F \text{ esteq}}$$

onde:

% Fe Total = porcentagem de ferro contido na amostra

V_a = volume de $K_2Cr_2O_7$ em ml gasto na titulação da amostra

Fe esteq = fator estequiométrico do ferro (0,55847)

M_a = massa da amostra em g

% ferro padrão = porcentagem de ferro na amostra padrão

V_{pad} = volume de $K_2Cr_2O_7$ em ml gasto na titulação do padrão

M_{pad} = massa da amostra padrão em g

$[1 - (T_2 - T_1) \cdot 0,0002]$ - Correção do volume em virtude da variação de temperatura

T_2 - Temperatura de preparo da solução

T_1 - Temperatura da solução durante a titulação

Nota: O teor de ferro corrigido será obtido utilizando-se dois padrões diferentes e será usado enquanto durar a solução de $K_2Cr_2O_7$.

A correção de temperatura será efetuada conforme a tabela 3.6.1.

Tabela 1 – Tabela de correção de temperatura.

Tabela de correção de temperatura	
[1-(T ₂ -T ₁).0,0002]	
T₂-T₁	Correção
-10	1,0020
-9	1,0018
-8	1,0016
-7	1,0014
-6	1,0012
-5	1,0010
-4	1,0008
-3	1,0006
-2	1,0004
-1	1,0002
0	1,0000
1	0,9998
2	0,9996
3	0,9994
4	0,9992
5	0,9990
6	0,9988
7	0,9986
8	0,9984
9	0,9982
10	0,9980

T₁ = Temperatura no horário da titulação .

T₂ = Temperatura no horário de preparo da solução.

Solubilizar amostras para leitura no ICP - Método 2

Reagentes e soluções:

- 1 - Ácido Clorídrico (HCl), $d= 1,19 \text{ g/ml}$
- 2 - Carbonato de Sódio Anidro (Na_2CO_3)
- 3 - Tetraborato de Sódio Anidro ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)
- 4 - Mistura fundente (tetraborato de sódio + carbonato de sódio) 1+2.

Procedimento:

- Pesar aproximadamente 0,5000 g de amostra, transferir para cadinho de platina.
- Adicionar aproximadamente 1,2 g de mistura fundente. Homogeneizar.



Figura 6 – Amostra e fundente no cadinho.

- 2 - Fundir em forno mufla à $\pm 1030^\circ\text{C}$ por 30 minutos.

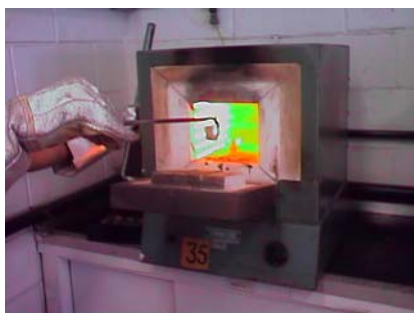


Figura 7 – Colocação do cadinho na mufla a 1030°C , para fusão da amostra.

3 - Adicionar em bécker de 250 ml, 10 ml de HCl e aproximadamente 50 ml de H₂O dest. , tampar e levar a chapa elétrica para aquecer até fervura. Dissolver a massa fundida colocando o cadinho dentro do bécker contendo a solução de HCl quente, sob agitação manual.



Figura 8 – Solubilização da amostra na chapa, após fundição na mufla.

OBS: A Norma indica fazer a dissolução da amostra a uma temperatura em torno de 70°C. Optamos, internamente, fazer esta dissolução a uma temperatura superior a 150°C.

4 - Manter o becker na extremidade da chapa para evitar projeção.



Figura 9 – Amostra após solubilização.

5 - Retirar o cadinho do becker e transferir a solução para balão de 100 ml devidamente identificado. Esfriar a solução, aferir e homogeneizar.

OBS: A transferência da solução deve ser imediata para evitar reprecipitação.



Figura 10 – Transferência da amostra solubilizada para o balão volumétrico.

6 - Fazer leitura conforme manual de metodologias do Espectrômetro de Plasma.



Figura 11 – Leitura das amostras no plasma.

Limites de Detecção do Plasma:

SiO₂ – 0,10%

MgO – 0,010%

Al₂O₃ – 0,10%

TiO₂ – 0,010%

P – 0,010%

Mn – 0,010%

CaO – 0,010%

Para as amostras com resultados menores que o limite de detecção , informar o valor do limite de detecção do aparelho.

Determinar o teor de PPC

Procedimento:

1 - Pesar um cadinho de porcelana previamente seco. Adicionar aproximadamente 1,0 g da amostra (m_1).



Figura 12 – Pesagem da amostra na balança analítica.

2 - Levar ao forno mufla à +/- 1000°C por 1 hora +/- 10 minutos.



Figura 13 – Colocação da amostra na mufla para efetuar a perda por calcinação.

2 - Esfriar em dessecador até a temperatura ambiente pesar (m_2).



Figura 14 – Esfriamento da amostra até a temperatura ambiente.

Cálculo:

$$\% \text{ PPC} = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m_a}$$

onde :

m_1 = massa do cadinho = massa da amostra, em grama

m_2 = massa do cadinho após a calcinação, em grama

m_a = massa da amostra, em grama

Anexo 3

Análises químicas via úmida das amostras dos produtos e das tipologias de cada amostra.

Amostras dos produtos e tipologias	Teores elementos maiores e menores (%)																			Fechamento Químico
	% Granul.	Fe total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	S	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	PPC (Perda ao fogo)	
LO JGD - Produto	100,00	67,45	1,38	0,75	0,101	0,264	0,25	0,017	0,030	0,038	0,010	0,003	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,012	1,05	100,29
LO-JGD - CO	68,60	67,54	0,93	0,78	0,093	0,042	0,35	0,017	0,020	0,038	0,010	0,002	0,004	0,003	0,003	0,002	0,001	0,002	1,44	100,07
LO-JGD - CP	16,60	68,18	0,86	0,66	0,055	0,024	0,32	0,027	0,030	0,055	0,010	0,003	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,85	100,14
LO-JGD - PO	9,60	67,25	0,98	0,89	0,120	0,058	0,32	0,014	0,030	0,019	0,010	0,002	0,003	0,001	0,003	0,002	0,001	0,003	1,55	100,00
LO-JGD - CA	5,60	65,34	0,84	1,96	0,288	0,024	0,37	0,026	0,035	0,059	0,010	0,003	0,004	0,002	0,003	0,008	0,002	0,005	2,92	99,97
LO CMT - Produto	100,00	67,47	1,17	0,80	0,032	0,012	0,37	0,017	0,010	0,050	0,012	0,005	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	1,32	99,94
LO-CMT - CO	43,17	68,50	0,84	0,45	0,020	0,014	0,35	0,022	0,011	0,035	0,014	0,005	0,006	0,007	0,001	0,001	0,001	0,004	0,78	100,16
LO-CMT - CP	31,60	68,31	0,98	0,55	0,025	0,012	0,35	0,023	0,011	0,037	0,010	0,005	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,92	100,28
LO-CMT - PO	10,77	68,23	0,93	0,58	0,020	0,010	0,44	0,015	0,010	0,020	0,010	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,92	100,10
LO-CMT - CA	15,00	64,92	1,24	2,04	0,073	0,010	0,31	0,014	0,010	0,070	0,015	0,004	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	3,89	100,28
LO TAM - Produto	100,00	66,82	1,65	1,10	0,030	0,063	0,41	0,029	0,017	0,049	0,010	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001	0,004	0,002	1,49	100,04
LO-TAM - CO	24,30	68,13	1,43	0,44	0,024	0,020	0,32	0,034	0,016	0,020	0,010	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,57	100,02
LO-TAM - CP	52,50	67,55	1,69	0,69	0,024	0,036	0,35	0,029	0,012	0,026	0,010	0,005	0,004	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,96	100,10
LO-TAM - PO	11,20	65,90	1,78	1,77	0,032	0,121	0,25	0,018	0,014	0,022	0,010	0,004	0,004	0,002	0,001	0,001	0,002	0,004	2,05	100,12
LO-TAM - CA	12,00	62,90	1,18	3,49	0,075	0,052	0,41	0,014	0,022	0,062	0,010	0,003	0,006	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003	5,13	100,08
LO VGR - Produto	100,00	68,00	0,86	0,71	0,026	0,017	0,37	0,025	0,014	0,048	0,010	0,005	0,006	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	1,11	100,09
LO-VGR - CO	75,40	68,65	0,78	0,49	0,020	0,013	0,37	0,027	0,011	0,035	0,010	0,005	0,016	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,57	100,15
LO-VGR - CP	13,00	68,10	0,87	0,78	0,019	0,032	0,30	0,019	0,010	0,024	0,010	0,003	0,017	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,83	100,00
LO-VGR - PO	5,00	66,80	0,65	2,15	0,020	0,030	0,28	0,012	0,010	0,035	0,010	0,004	0,016	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	1,67	100,14
LO-VGR - CA	6,50	63,20	0,87	3,03	0,117	0,022	0,35	0,011	0,013	0,094	0,015	0,004	0,007	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	5,44	100,13
LO ABO - Produto	100,00	67,69	0,55	0,72	0,051	0,010	0,38	0,010	0,010	0,097	0,014	0,003	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	1,78	100,09
LO-ABO - CO	39,40	68,82	0,35	0,42	0,028	0,010	0,41	0,010	0,010	0,056	0,010	0,003	0,005	0,003	0,001	0,001	0,001	0,004	0,78	100,12
LO-ABO - CP	32,00	68,34	0,38	0,76	0,030	0,010	0,26	0,010	0,010	0,069	0,010	0,004	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	1,30	100,34
LO-ABO - PO	7,30	66,39	0,54	1,25	0,077	0,010	0,49	0,010	0,010	0,165	0,010	0,004	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	3,01	100,11
LO-ABO - CA	21,30	64,96	0,46	1,12	0,100	0,010	0,25	0,010	0,010	0,201	0,010	0,005	0,007	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	4,86	99,80
LO PIC - produto	100,00	68,64	0,10	0,10	0,038	0,090	0,35	0,016	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,32	99,91
LO-PIC - CO	38,70	68,52	0,54	0,37	0,020	0,015	0,27	0,016	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,68	99,67
LO-PIC - CP	38,50	68,03	0,67	0,55	0,035	0,061	0,34	0,015	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,03	99,73
LO-PIC - PO	5,40	66,63	0,66	0,92	0,042	0,554	0,25	0,013	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,74	99,45
LO-PIC - CA	17,30	63,59	1,08	2,19	0,106	0,088	0,30	0,014	0,040	0,063	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	4,72	99,40
LO-PIC - IB	0,10	57,11	14,02	4,10	0,030	0,120	0,30	0,010	0,010	0,035	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,93	101,00

Amostras dos produtos e tipologias	% Granul.	Teores elementos maiores e menores (%)																		Fechamento	
		Fe total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	S	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	PPC (Perda ao fogo)	Químico	
LO CPX - Produto	100,00	64,31	0,35	2,95	0,025	1,470	0,35	0,029	0,111	0,036	0,010	0,006	0,011	0,001	0,001	0,001	0,009	0,035	2,38	99,77	
LO-CPX - CO	15,80	67,71	0,29	0,31	0,013	0,113	1,44	0,034	0,089	0,022	0,005	0,005	0,008	0,004	0,001	0,001	0,004	0,052	0,63	99,67	
LO-CPX - CP	47,10	65,92	0,30	1,01	0,015	2,290	0,41	0,022	0,190	0,014	0,010	0,005	0,014	0,001	0,001	0,002	0,011	0,063	1,01	99,80	
LO-CPX - PO	18,50	62,22	0,35	5,07	0,017	1,220	0,35	0,016	0,045	0,031	0,010	0,005	0,013	0,001	0,001	0,002	0,005	0,052	3,55	99,65	
LO-CPX - CA	2,70	62,05	1,09	3,99	0,110	0,155	0,28	0,019	0,024	0,175	0,010	0,006	0,008	0,001	0,001	0,001	0,003	0,005	5,52	100,00	
LO-CPX - PM (proto-minério)	15,90	58,08	0,69	8,43	0,063	0,612	0,41	0,079	0,067	0,085	0,010	0,005	0,010	0,001	0,001	0,001	0,003	0,020	6,55	99,89	
PO A PIC Produto	100,00	66,20	3,30	0,76	0,030	0,062	0,28	0,020	0,032	0,027	0,010	0,002	0,006	0,001	0,002	0,002	0,001	0,004	1,20	100,15	
PO A PIC - CO	57,90	67,13	2,95	0,35	0,020	0,110	0,25	0,018	0,017	0,024	0,010	0,002	0,004	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005	0,55	100,09	
PO A PIC - CP	14,20	66,53	3,31	0,47	0,026	0,180	0,37	0,013	0,031	0,026	0,010	0,002	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,83	100,11	
PO A PIC - PO	15,10	66,30	3,04	0,79	0,038	0,093	0,26	0,011	0,021	0,029	0,010	0,002	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	1,18	100,09	
PO A PIC - CA	6,70	62,23	3,00	2,82	0,114	0,032	0,38	0,010	0,016	0,188	0,010	0,004	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	4,91	100,24	
PO A PIC - IB	6,10	54,56	21,30	0,50	0,024	0,010	0,49	0,016	0,018	0,024	0,010	0,002	0,003	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,81	100,76	
PO B PIC - produto	100,00	62,64	7,21	0,93	0,050	0,084	0,34	0,014	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	2,10	100,07	
PO B PIC - CO	32,20	66,96	3,22	0,37	0,024	0,030	0,28	0,016	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,67	100,14	
PO B PIC - CP	25,00	64,69	5,16	0,56	0,032	0,025	0,25	0,013	0,010	0,012	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,18	99,55	
PO B PIC - PO	16,70	66,17	2,17	0,92	0,054	0,123	0,35	0,018	0,010	0,085	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,71	99,82	
PO B PIC - CA	12,50	60,31	7,97	0,67	0,073	0,123	0,40	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	4,10	99,34	
PO B PIC - IB	13,60	48,29	27,94	1,31	0,043	0,012	0,54	0,010	0,010	0,139	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,63	100,21	
LO B PIC - produto	100,00	66,55	0,96	1,25	0,046	0,258	0,40	0,013	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,94	99,79	
LO B PIC - CO	23,00	68,23	0,50	0,56	0,028	0,013	0,28	0,016	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,10	99,85	
LO B PIC - CP	48,70	67,50	0,76	0,61	0,037	0,209	0,41	0,014	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,56	98,84	
LO B PIC - PO	8,60	62,55	0,95	1,29	0,071	2,878	0,35	0,027	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	3,08	98,69	
LO B PIC - CA	19,70	62,77	1,03	2,32	0,114	0,251	0,40	0,012	0,010	0,090	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,012	5,49	99,30	
LO ITA PIC - Produto	100,00	59,56	8,26	1,36	0,068	0,144	0,50	0,026	0,044	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	4,59	99,80	
LO ITA PIC - CO	9,40	61,50	7,90	2,10	0,045	0,120	0,36	0,015	0,010	0,080	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	2,92	101,23	
LO ITA PIC - PO	4,50	64,60	4,25	1,25	0,074	0,135	0,40	0,020	0,010	0,045	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	2,68	100,98	
LO ITA PIC - CA	16,60	57,38	5,20	6,01	0,036	0,100	0,45	0,010	0,010	0,120	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	7,81	101,42	
LO ITA PIC - IB	69,50	58,89	4,82	6,30	0,051	0,450	0,35	0,010	0,010	0,040	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	5,75	101,84	

Nomenclatura das tipologias: Produto - análise química média da amostra; CO - compacta; CP - compacto-porosa; PO - porosa; CA - canga; IB - itabirito; PM - proto minério.

Anexo 4

Descrições mineralógicas das seções polidas das tipologias dos produtos granulados de minério de ferro.

AMOSTRA: CMT - Tipologia CO

DESCRIÇÃO:

A amostra é formada por duas porções distintas. A primeira e mais abundante é compacta e composta predominantemente por hematita granular (85%) apresentando grãos de tamanhos variados (10 a 60 μ m). Agregados de grãos muito finos da hematita granular (menor que 10 μ m), com contatos retos e bem definidos são observados. Observam-se agregados de grãos de hematita sinuosa (grãos com contatos irregulares, imbricados, com presença de micro poros e raros relictos de magnetita) dispersos em meio à hematita granular predominante (figura 1a). Estes grãos apresentam dimensões variando entre 10 a 60 μ m e representam aproximadamente 12% da amostra.

Na segunda porção da rocha observa-se um bandamento marcado por porções distintas compostas por hematita granular/lamelar fina e por hematita sinuosa mais grossa (figura 1b). Localmente observam-se grãos de hematita lamelar orientados segundo a direção do bandamento.

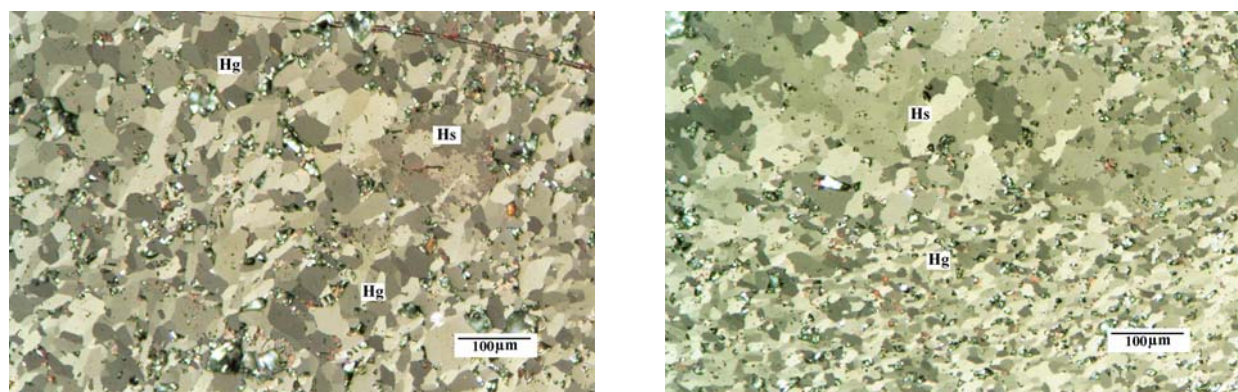


Figura 1: **a** – Grãos de hematita granular(Hg) e agregado de grãos de hematita sinuosa(Hs). **b** – Fotomicrografia ilustrando o bandamento da rocha marcado pelos diferentes tipos de hematita presentes (Hs – hematita sinuosa e Hg). Microscopia óptica de luz refletida(MOLR); Luz polarizada(Lp); Nicóis semi-cruzados(Nsc).

AMOSTRA: CMT - Tipologia CA**DESCRIÇÃO:**

A hematita sinuosa (63%) predomina nesta amostra de textura porosa e hematita martítica (10%) ocorre associada (figuras 2a e b). A hematita sinuosa mostra grãos irregulares formando agregados que apresentam contatos pouco desenvolvidos com bordas corroídas, podendo conter relictos de magnetita. As dimensões mais frequentes destes grãos são de 10 a 30 μ m. Grãos euédricos de martita apresentam a estrutura em treliça típica do processo de martitização, microporos e ainda relictos de magnetita. Além destes grãos em avançado processo de oxidação, observa-se magnetita bem preservada em início do processo representando mais de 70% do grão (figura 3a). Porções contendo hematita granular (5%) mostrando por vezes bordas corroídas cujos tamanhos que variam de 10 a 50 μ m, e outras onde predomina a hematita fina (~10 μ m) são observadas. Hematita lamelar (2%) ocorre em menor proporção. Hidróxido de ferro ocorre na forma de goethita botrioidal circundando agregados de grãos de hematita e preenchendo cavidades e fraturas existentes na rocha, e ainda na forma de uma matriz goethítica-limonítica (goethita terrosa) contendo grãos de quartzo e de hematita (figuras 3b), ou seja, com grande representatividade na amostra (20%).

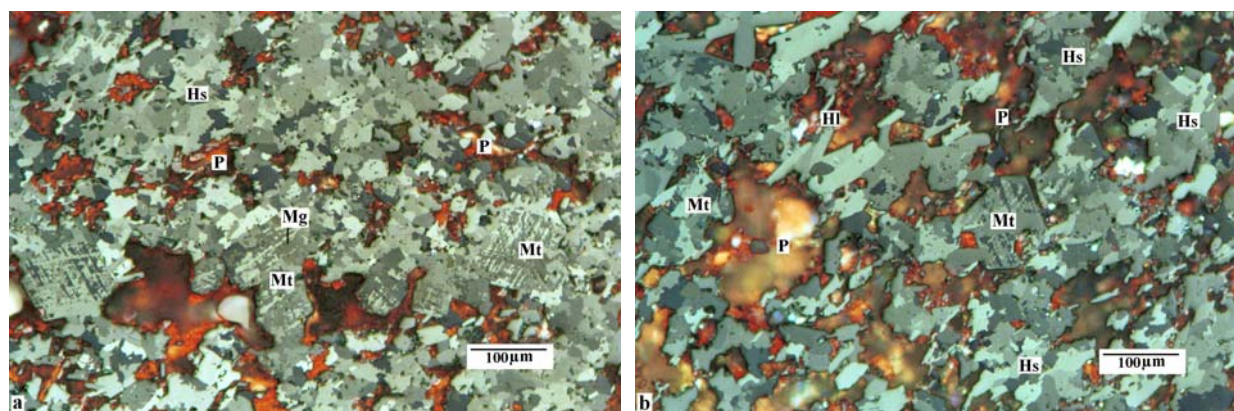


Figura 2a e b – porção composta por agregados de grãos de hematita sinuosa(Hs) contendo grãos euédricos de martita(Mt) com estrutura em treliça preservada, microporos e magnetita(Mg) relictos. Hl – hematita lamelar; P – poro. MOLR; Lp, Nsc.

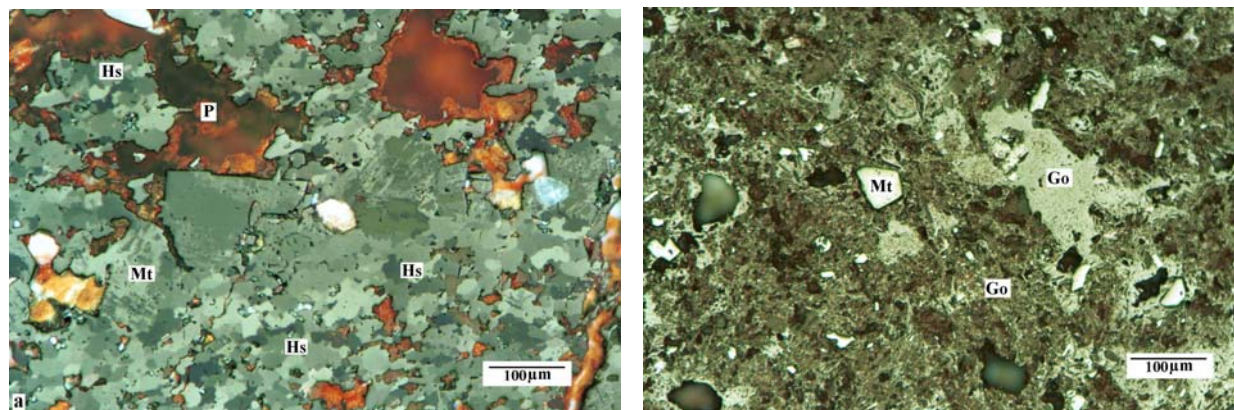


Figura 3: a – hematita sinuosa associada a grãos de martita onde a magnetita bem preservada ocupa boa parte do grão. MOLR, Lp, Nsc; b – massa goethítica contendo grãos de martita dispersos. MOLR; Apenas polarizador(Ap).

AMOSTRA: CMT - Tipologia PO**DESCRIÇÃO:**

A rocha apresenta duas porções: uma bandada e menos porosa e outra mais porosa. A diferença de tamanho de grãos e a presença de poros marcam o bandamento da primeira porção. Esta é composta por hematita granular (70%) com tamanhos variados, mostrando regiões onde predominam hematita mais grossa (tamanhos variando de 20 a 60 μ m) e outras onde predomina hematita fina cujos grãos têm aproximadamente 10 μ m de tamanho, algumas vezes associada à hematita sinuosa (19%) (figuras 4a e b).

Na porção mais porosa da rocha observa-se a presença de grãos de martita (5%) irregulares, micro porosos e contendo relictos de magnetita (2%) (figura 5a). Em alguns destes grãos a estrutura em treliça ainda é visível. Hematita lamelar (4%) fina com alguma orientação forma bandas envolvendo as porções martíticas. Na figura 5b observa-se uma porção rica em hematita sinuosa contendo magnetita, e hematita lamelar/granular preenchendo cavidades preexistentes.

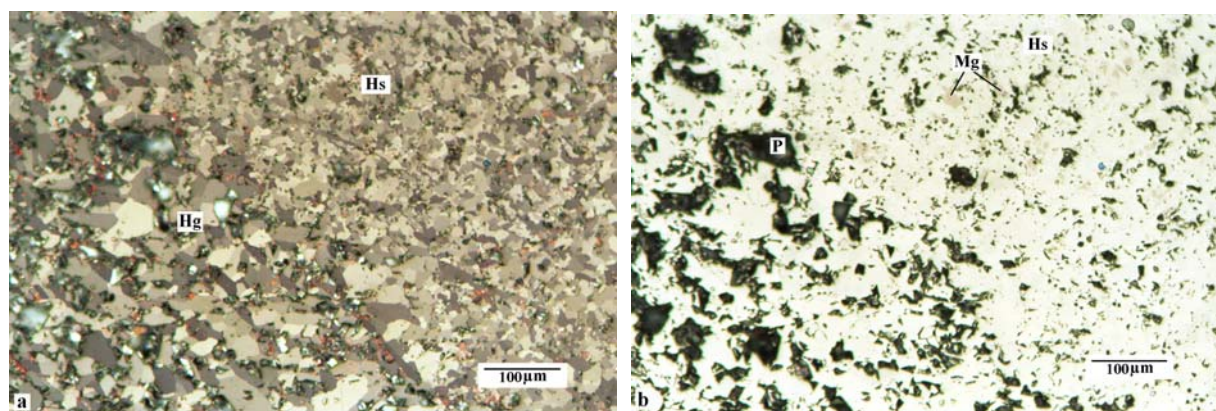


Figura 4: **a** – Agregados de grãos de hematita granular (Hg) e hematita sinuosa fina (Hs); MOLR, Lp, Nsc; **b** – mesma área usando-se apenas polarizador (Ap) onde pode-se observar magnetita (Mg) relictos na hematita sinuosa. MOLR, Ap.

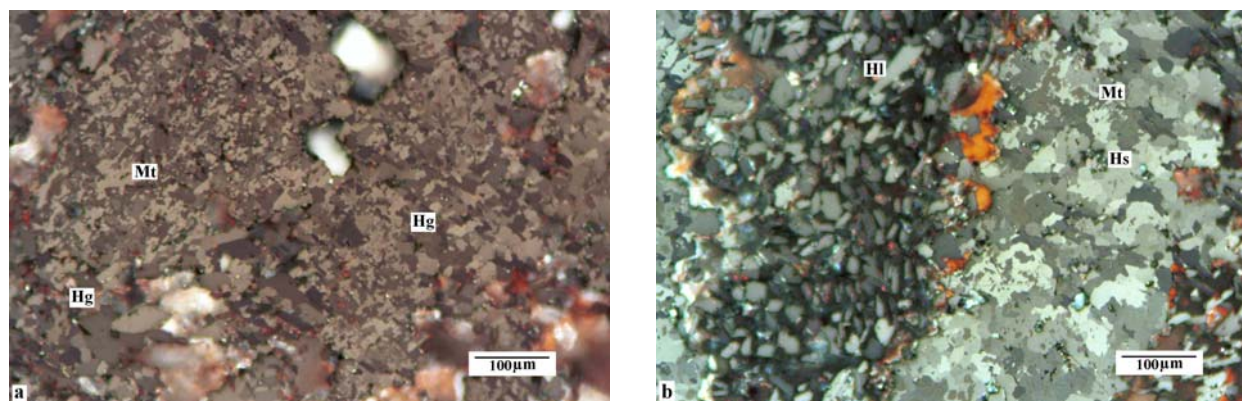


Figura 5: **a** – Porção porosa: martita (Mt), hematita granular (Hg) fina e média. **b** – martita, hematita lamelar (Hl) preenchendo cavidades e hematita sinuosa (Hs). MOLR, Lp, Nsc.

AMOSTRA: CMT - Tipologia CP**DESCRIÇÃO:**

A amostra porosa, apresentando um bandamento marcado tanto pela porosidade quanto pela diferença de tipos de hematita presentes (figuras 6a e b). A primeira porção é mais compacta e é composta por hematita lamelar, granular e sinuosa. Os grãos da hematita sinuosa (48%) predominam nesta porção, apresentando contatos imbricados podendo conter magnetita residual (5%). Grãos de hematita martítica (2%) bastante alterados ocorrem mostrando restos da estrutura em treliça típica do processo de martitização e ainda uma micro porosidade evidente.

A segunda porção é composta por hematita granular variando de muito fina (grãos menores que 10µm) a média (10 a 60µm) e por hematita lamelar (12%) em menor proporção. A hematita granular predomina (29%), porém algumas vezes estes grãos ficam tão finos que se torna difícil distinguir o contorno (hematita microcristalina). Goethita (2%) pode ser observada preenchendo fraturas que cortam a amostra (figuras 6c e d) e ainda grãos de quartzo (2%) preenchendo cavidades e espaços existentes entre os grãos principalmente na porção mais porosa da rocha.

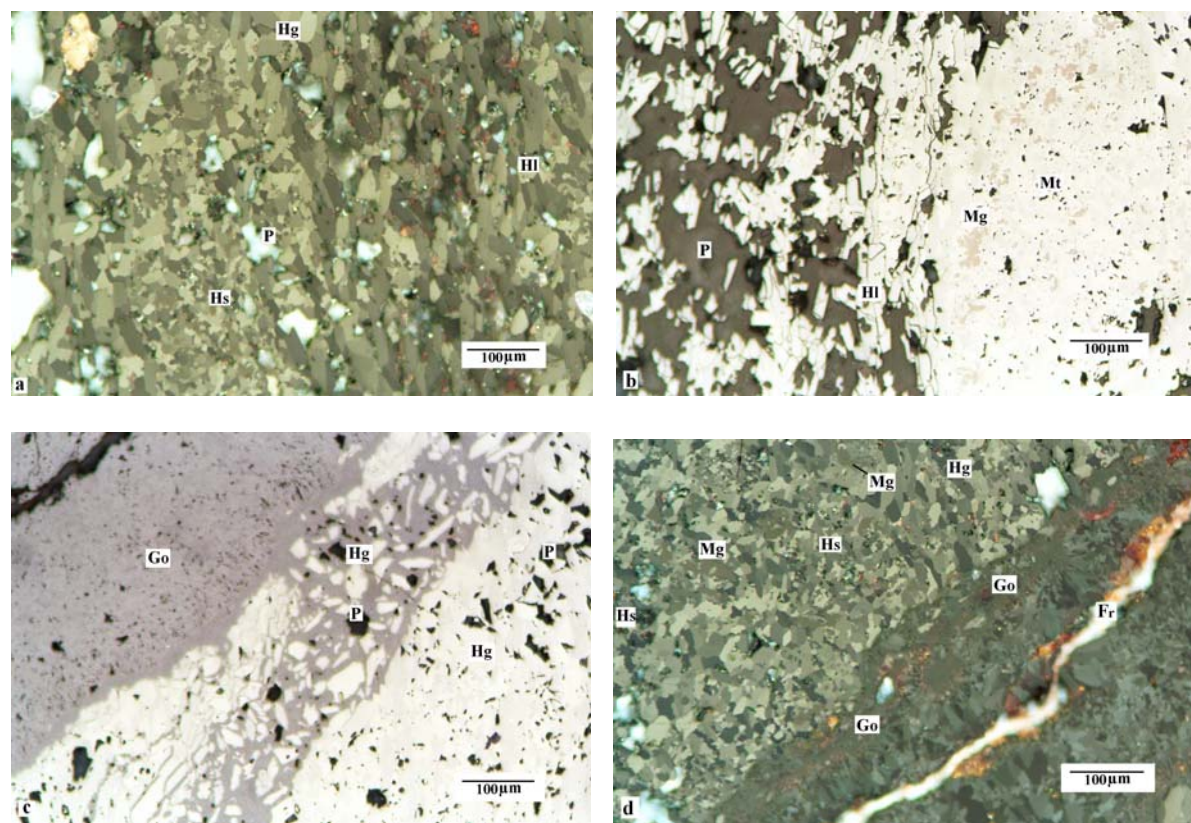


Figura 6: a – diferentes tipos de hematita (lamelar-Hl, granular-Hg e sinuosa-Hs) marcando um bandamento na rocha; MOLR, Lp, Nsc. b – porções mais e menos porosas compostas por hematita lamelar e martita com magnetita (Mg) relict; MOLR, Ap. c e d – goethita (Go) cortando a rocha e preenchendo fraturas; P – poros, Fr – fratura; MOLR, Lp, Nsc.

AMOSTRA: ABO - Tipologia CO**DESCRIÇÃO:**

Rocha composta predominantemente por hematita granular (94%), com grãos equidimensionais, mostrando contatos regulares e de variados tamanhos, sendo os de 10 a 20 μ m os mais comuns (figura 7a e b). Hematita lamelar também ocorre (2%), apresentando cristais tabulares de tamanhos variados e localmente imprimindo certa orientação à rocha. Algumas vezes observam-se lamelas de hematita envolvendo bolsões (agregados poli cristalinos) de hematita sinuosa (2%) contendo magnetita relictas (1%) e hematita granular. Magnetita dispersa em meio aos grãos de hematita granular e lamelar podem ser observados (figura 8a e b). Observam-se grãos de quartzo (1%) em meio à hematita granular.

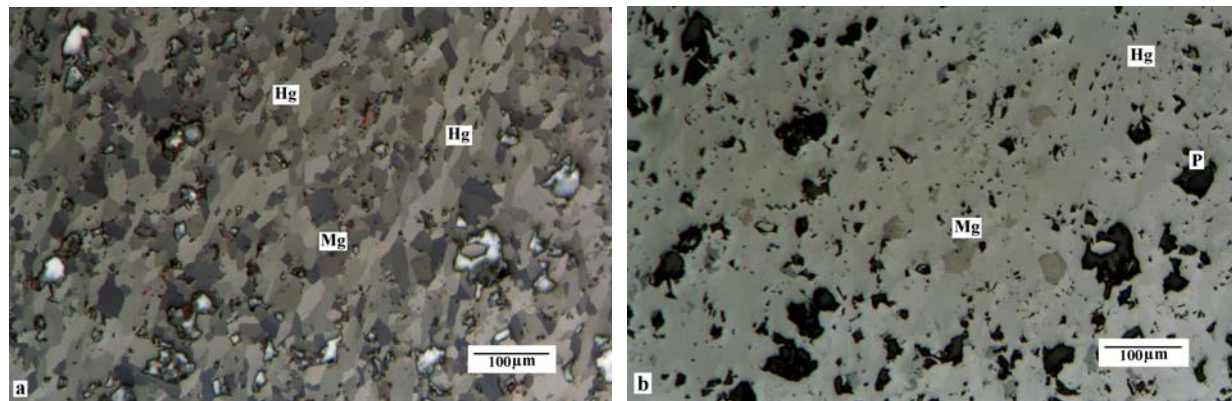


Figura 7a e b: – Hematita granular (Hg) predominante na amostra e magnetita (Mg); MOLR, Lp, a – Nsc; b – Ap. P – poros.

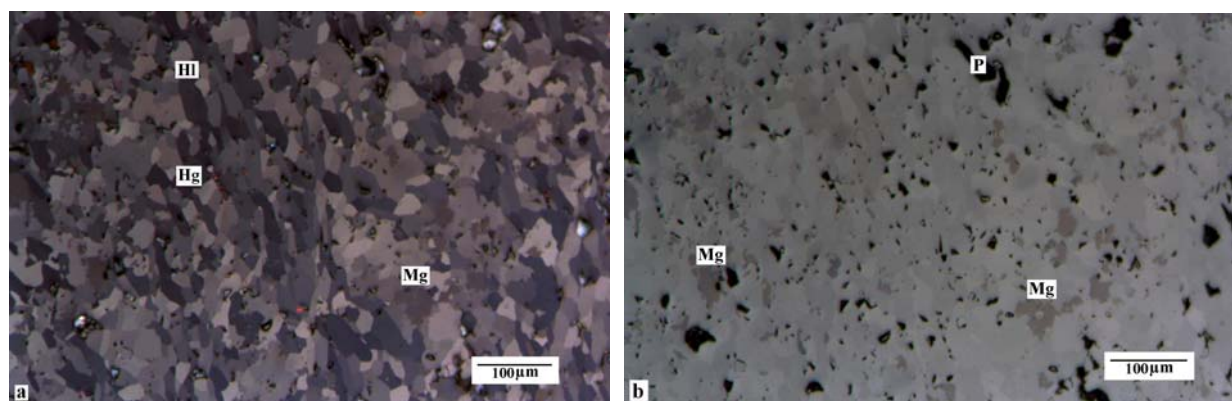


Figura 8: Hematita granular (Hg) e lamelar (Hl) e magnetita (Mg) relictas. MOLR, Lp. a – Nsc; b – Ap.

AMOSTRA: ABO - Tipologia CA**DESCRIÇÃO:**

Rocha porosa composta por porções de hematita granular, lamelar e martítica e ainda hidróxidos de ferro (goethita e limonita).

Observa-se uma porção predominantemente formada por hematita granular (46%) com hematita lamelar (5%) subordinada, e ainda grãos de hematita sinuosa (3%) com contatos difusos e contendo relictos de magnetita (1%), dispersos nesta porção (figura 9 a e b). Estes grãos de martita podem mostrar a estrutura em treliça típica do processo de martitização. Em porções onde a hematita lamelar predomina esta imprime certa orientação à rocha (figura 10). A goethita (44%) ocorre, na forma botrioidal (figura 11a) mostrando a estrutura coliforme típica envolvendo agregados de grãos de hematita, e na forma micro porosa (massa cinza podendo conter grãos de hematita e quartzo) como pode ser observado na figura 11b. Observa-se ainda a presença de material limonítico (terroso) contendo partículas de hematita e grãos de quartzo (1%).

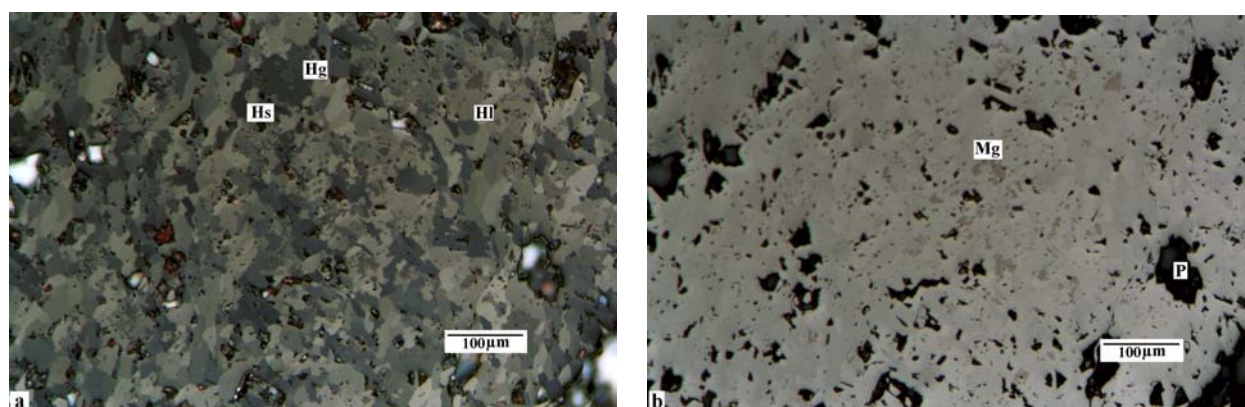


Figura 9: Porção composta por hematita granular (Hg), lamelar (Hl) e sinuosa (Hs). MOLR; **a** – Lp, Nsc, destacando o contorno dos grãos; **b** – Ap, permitindo uma melhor visualização da magnetita presente.

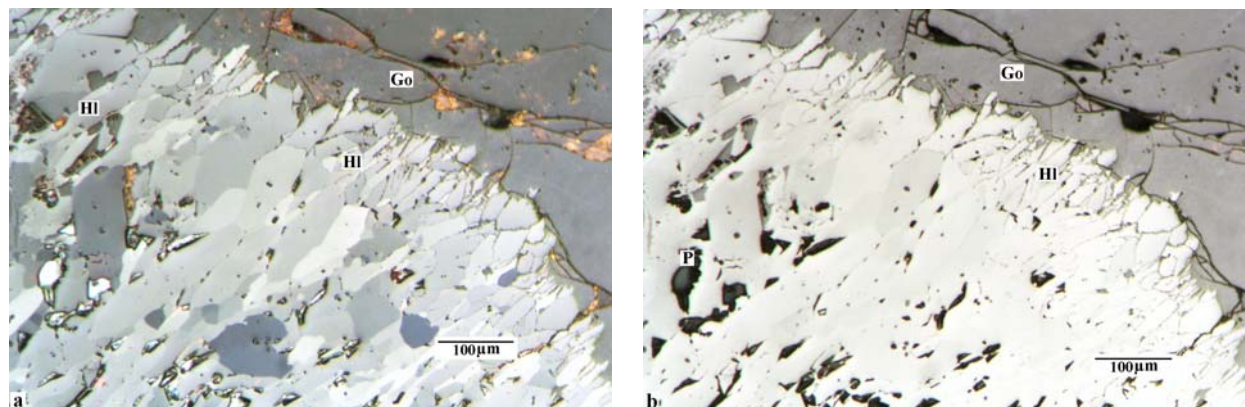


Figura 10: Agregado de grãos de hematita lamelar (Hl) orientados envolvidos por goethita (Go). MOLR, **a** – Lp, Nsc; **b** – Ap. P – poro.

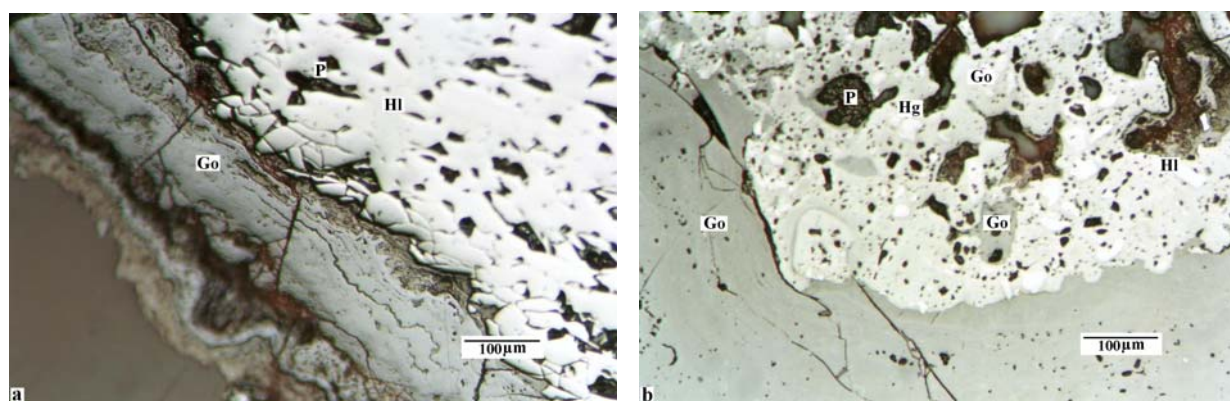


Figura 11: a – Goethita botrioidal (Go) envolvendo agregado de grãos de hematita lamelar; MOLR, Ap; b – Goethita botrioidal envolvendo uma porção composta por goethita micro porosa com grãos de hematita granular (Hg) e lamelar (Hl) dispersos; MOLR, Ap. P – poro.

AMOSTRA: ABO -Tipologia PO

DESCRIÇÃO:

A amostra é bastante porosa sendo a hematita granular (63%) o tipo predominante. Os tamanhos mais frequentes variam de 10 a 30µm, embora porções contendo grãos muito finos (~10µm) também ocorram (figura 12a). A martita (12%) ocorre apresentando micro poros, relictos de magnetita (1%) e a estrutura em treliça típica do processo de martitização (figura 13a e b). Podem ser observadas sombras de pressão em grãos maiores de martita (figura 12b). Hematita lamelar (13%) ocorre frequentemente na amostra preenchendo cavidades (grandes poros) como finas lamelas, desenvolvendo certa orientação na amostra e associada a grãos maiores de martita, por vezes envolvendo-os. Hematita sinuosa (3%) ocorre localmente mostrando contatos imbricados. Observam-se ainda porções contendo goethita (7%) micro porosa associada à martita e grãos de quartzo dispersos (1%). A rocha mostra uma orientação que pode ser visualizada na figura (figura 14a e b) onde a alternância de porções contendo grãos de hematita lamelar orientado e outra contendo hematita granular em região porosa marcam esta orientação.

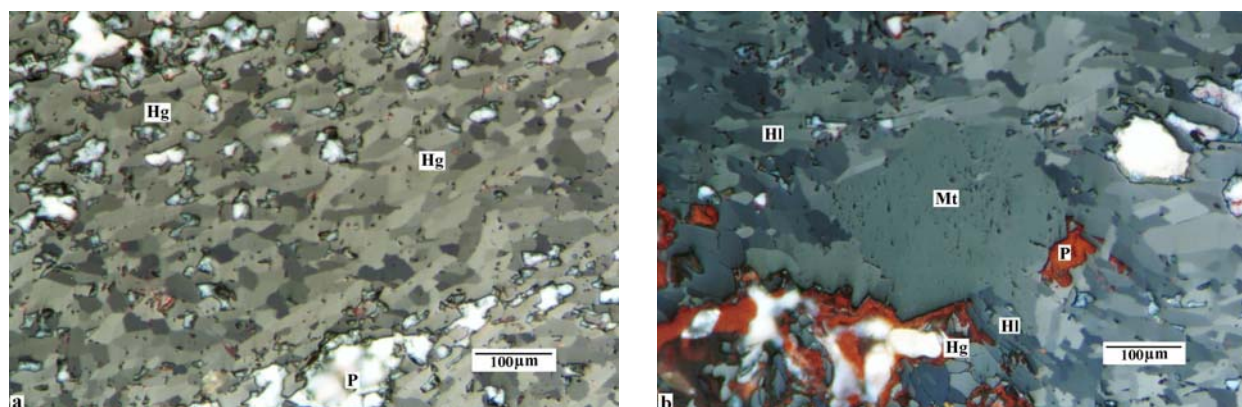


Figura 12: a – hematita granular fina (Hg) predominante na amostra. b – Grãos de martita (Mt) grandes envoltos por hematita lamelar (Hl) formando sombras de pressão; MOLR, Lp, Nsc.

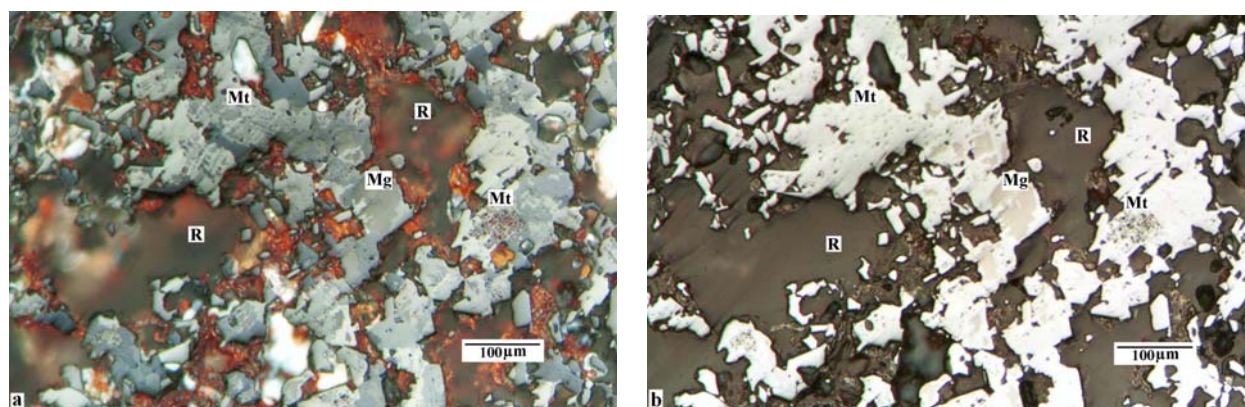


Figura 13: Porção composta por martita com estrutura em treliça, micro porosidade e magnetita relict. MOLR; **a** – Lp, Nsc; **b** – Ap. R – resina de impregnação.

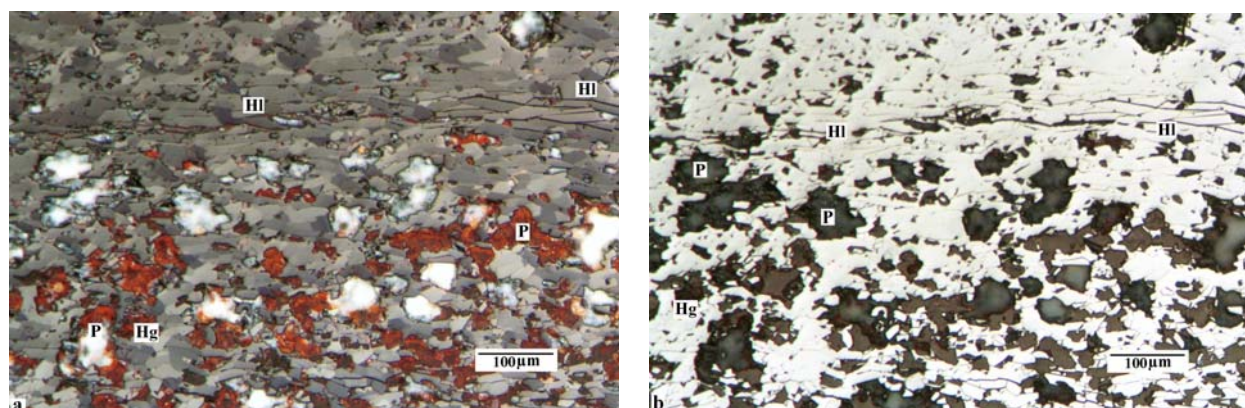


Figura 14: Bandamento marcado pela porosidade(P) e pelos diferentes tipos de hematita presentes: hematita lamelar (Hl) e granular (Hg). MOLR; **a** – Lp, Nsc; **b** – Ap.

AMOSTRA: ABO - Tipologia CP

DESCRIÇÃO:

Rocha composta por hematita granular (88%), lamelar (3%) e martita (8%). O tamanho de grão mais comum na hematita granular (figura15a) varia entre 10 e 20µm, com os mais grossos podendo chegar a 60µm. A hematita lamelar fina cujo tamanho mais freqüente é aproximadamente 5X30µm, em algumas porções imprime uma orientação à rocha (figura 15b). A martita é micro porosa podendo conter relictos de magnetita (1%) como pode ser observado na figura 16. Observa-se ainda um bandamento marcado pelos diferentes tipos de hematita presentes (figura16b), com porções compostas por hematita granular, lamelar orientada segundo o bandamento e granular contendo martita. Localmente observam-se porções mais porosas contendo maior quantidade de martita micro porosa.

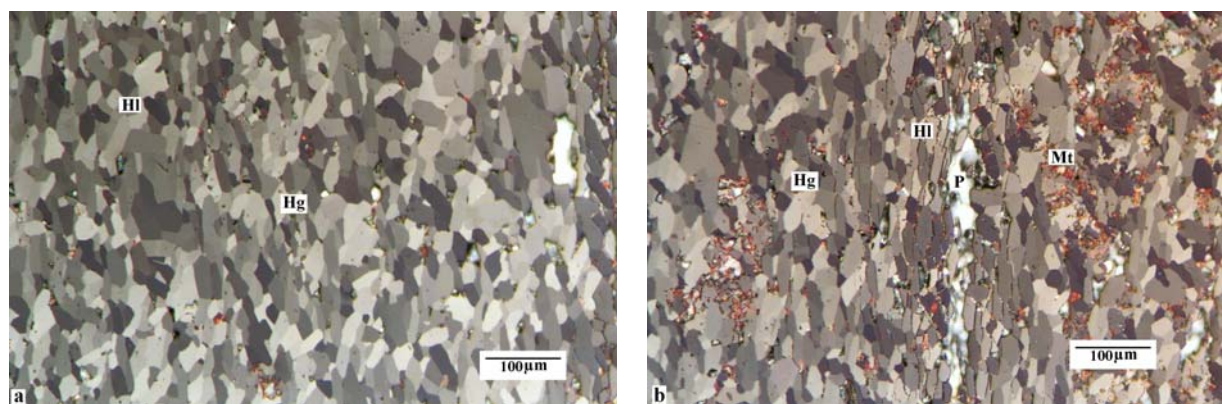


Figura 15: **a** – Fotomicrografia mostrando a predominância da hematita granular (Hg) na amostra contendo, porém, grãos de hematita lamelar (Hl) em menor proporção. **b** – Porções compostas por diferentes tipos de hematita (granular, lamelar e martítica) caracterizam um bandamento na amostra que é evidenciado pela presença de hematita lamelar orientada na poção central da fotomicrografia. P – poros. MOLR, Lp, Nsc.

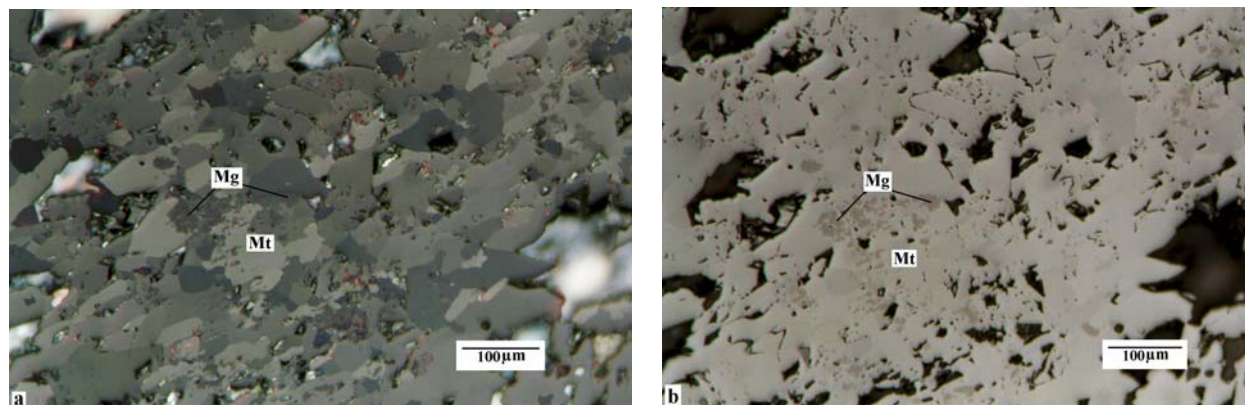


Figura 16: Observa-se a presença de martita contendo relictos de magnetita em meio à hematita granular tanto em **a** (MOLR, Lp, Nsc) quanto em **b** (MOLR, Ap).

AMOSTRA TAM - Tipologia CO

DESCRIÇÃO:

A amostra é homogênea composta por hematita granular fina (10µm) em sua maior parte (90%), embora hematita lamelar também ocorra (figura 17a), representando aproximadamente 8% da amostra. Observa-se uma leve orientação enfatizada pela porosidade existente na rocha (figura 18a). Os agregados de hematita granular muito fina observados podem conter raros grãos de martita micro porosos dispersos (figura 18b), grãos estes que mostram restos da estrutura em treliça e ainda magnetita relictas mais rara (2%). A hematita lamelar, por vezes encontra-se orientada segundo fissuras presentes na rocha. Hematita micro cristalina (<10µm) finíssima, com contatos pouco desenvolvidos, embora em pequena quantidade, pode ser observada (figura 17b).

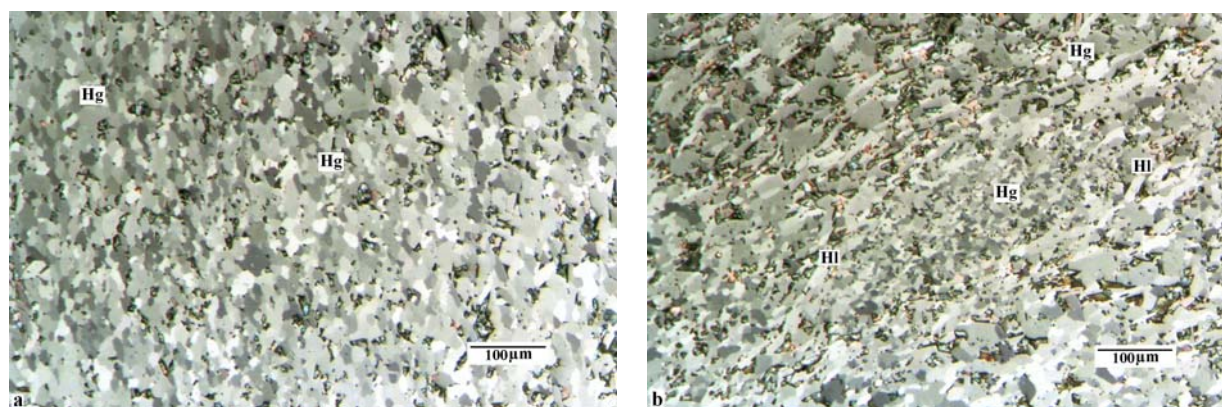


Figura 17: **a** – Aspecto geral da amostra onde se observa a predominância da hematita granular (Hg) muito fina. **b** – lente de hematita granular muito fina (micro cristalina) na região central da foto micrografia e hematita lamelar (Hl). MOLR, Lp, Nsc.

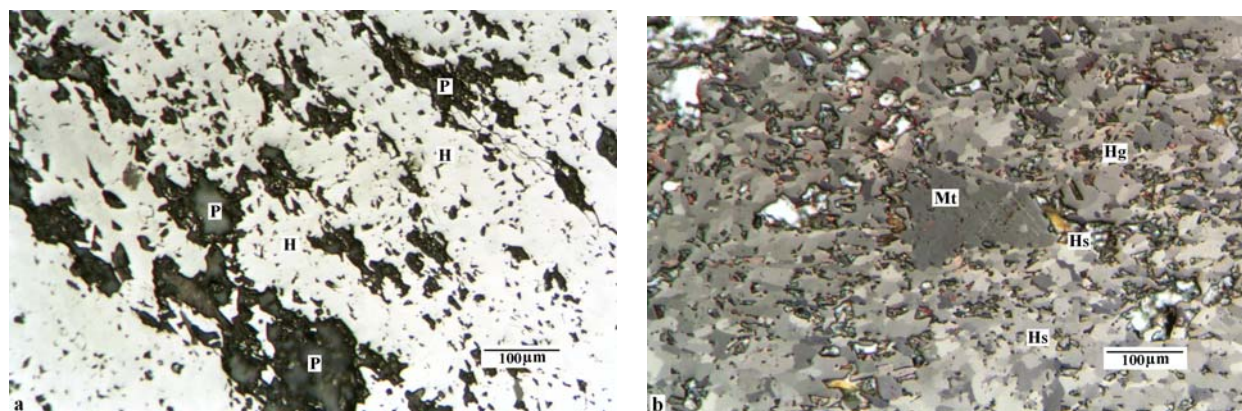


Figura 18: A porosidade (P) presente na amostra marca uma orientação incipiente que pode ser observada na foto micrografia **a** (MOLR, Ap). Em **b**, martita (Mt) com estrutura em treliça ainda preservada em meio à hematita granular (Hg) e hematita sinuosa (Hs) mais rara podem ser observados (MOLR, Lp, Nsc).

AMOSTRA TAM - Tipologia CA

DESCRIÇÃO:

Amostra composta predominantemente por goethita (74%) com variadas feições micro estruturais e associações variadas. Observa-se a goethita na forma de uma matriz micro porosa contendo: cristais euédricos de martita (3%), apresentando estrutura em treliça resultante do processo de martitização preservada (figura 19); grãos de magnetita (3%) bem preservados, ou seja, ainda no início do processo de martitização (figura 20a); grãos de hematita lamelar (12%) mais grossos dispersos nesta matriz (figura 20b); e agregados de grãos de hematita granular (8%) envoltos por esta matriz (figura 21). Relictos de magnetita estão presentes também nos grãos de martita. A goethita maciça ocorre como uma matriz envolvendo grãos de hematita granular e lamelar como mostrado na figura 22, e também na forma botrioidal, com a estrutura coliforme bem evidenciada.

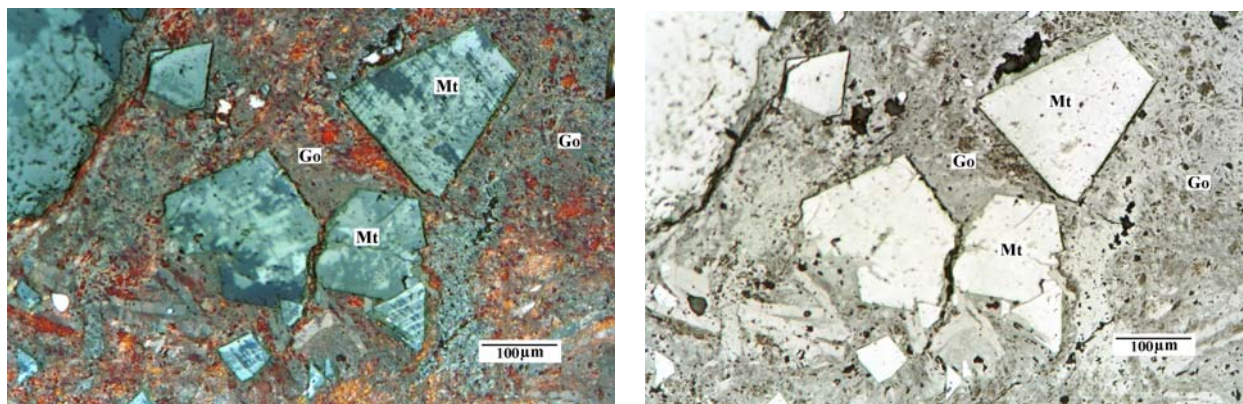


Figura 19: Matriz goethítica (Go) envolvendo grãos euédricos de martita (Mt) com estrutura em treliça preservada. **a** – MOLR, Lp, Nsc; **b** – MOLR, Ap.

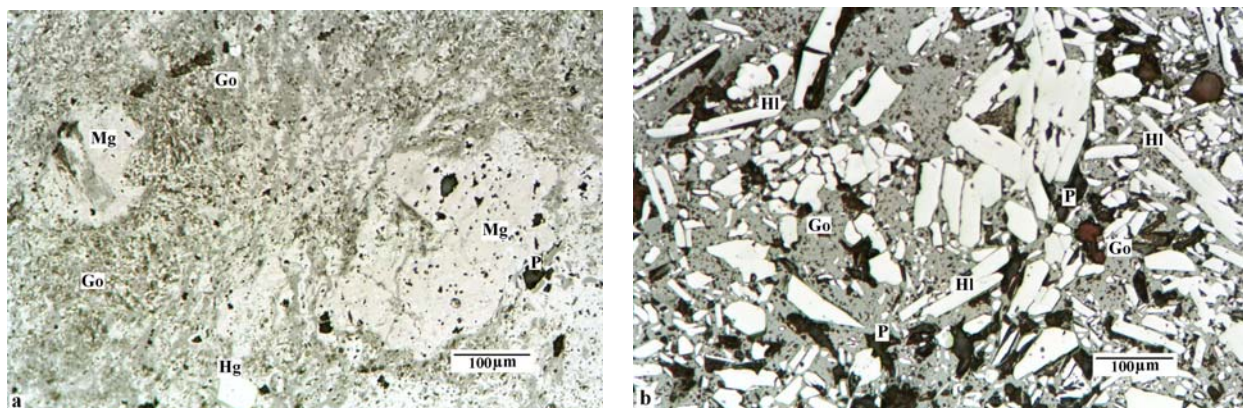


Figura 20: **a** – grãos de magnetita (Mg) bem preservados em matriz de goethita (Go). Hg – hematita granular. **b** – hematita lamelar em meio à matriz de goethita micro porosa. MOLR, Ap.

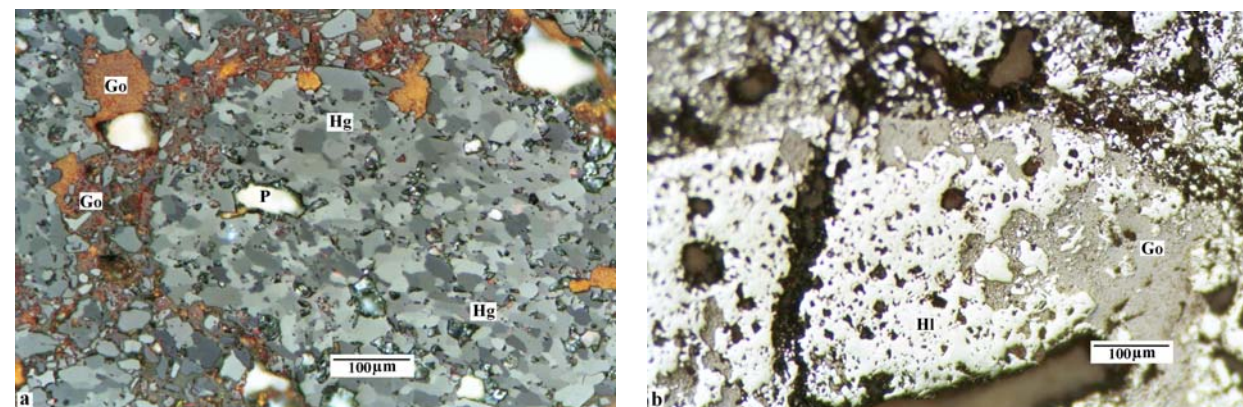


Figura 21: Agregados de grãos de hematita granular (Hg) e lamelar (Hl) envoltos pela matriz de goethita (Go) micro porosa. MOLR. **a** – Lp, Nsc; **b** – Ap.

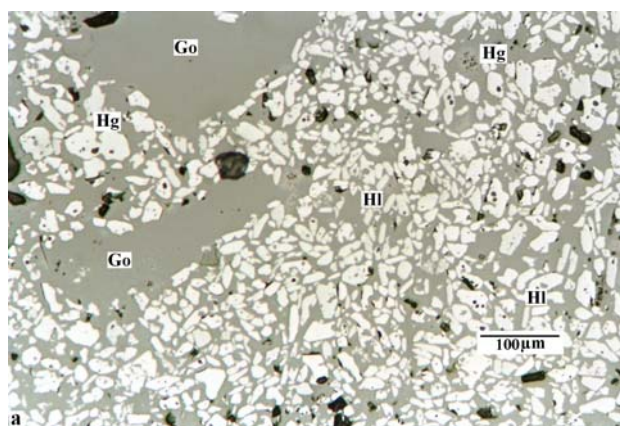


Figura 22: Goethita (Go) maciça envolvendo hematita lamelar (Hl) e granular (Hg). MOLR, Ap.

AMOSTRA TAM - Tipologia PO

DESCRIÇÃO:

A amostra apresenta duas porções distintas: uma menos porosa composta por hematita lamelar (27%) e granular (30%) finas (figura 23a), e outra mais porosa, composta predominantemente por martita (12%) euédrica contendo micro poros e magnetita (3%) relictos (figura 23b) e agregados de hematita granular e sinuosa (27%). Esta porção apresenta uma orientação marcada pela porosidade (figura 24a). A magnetita contida na martita varia de relictos a porções com maior representatividade nestes grãos. Em alguns casos é possível observar ainda a estrutura em treliça e em outros, não há mais magnetita presente, só a micro porosidade resultante do processo. Na figura 25 observa-se um bandamento marcado pelos diferentes tipos de hematitas presentes. Agregados de grãos de magnetita sinuosa (com contatos irregulares e imbricados) são observados junto a esta porção porosa (figura 24b) com grãos euédricos de martita dispersos neles. Goethita (1%) mais rara pode também ser observada.

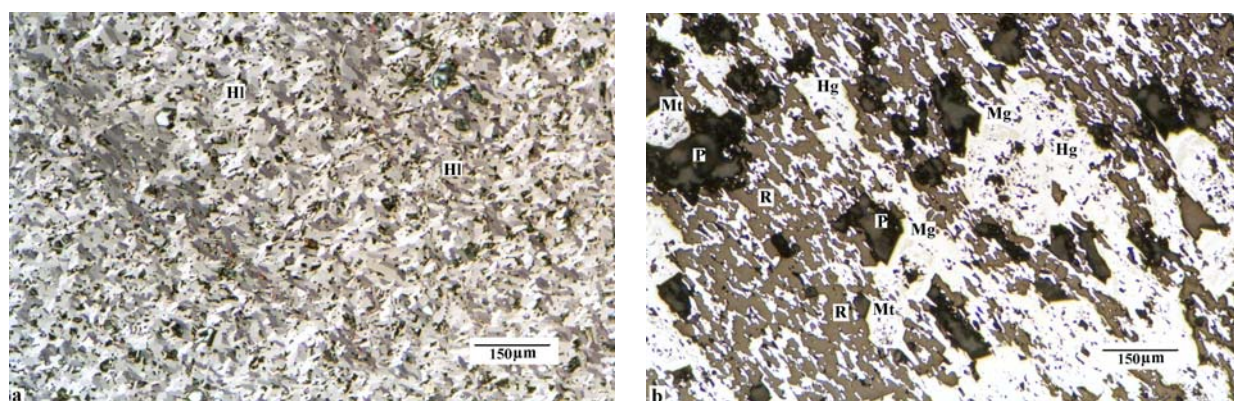


Figura 23: **a** – Aspecto geral da porção mais compacta da amostra composta por hematita lamelar (Hl) fina. MOLR, Lp, Nsc. **b** – Porção mais porosa onde se observa martita (Mt) micro porosa contendo relictos de magnetita (Mg). Hg – hematita granular; P – poros; R – resina de impregnação. MOLR, Ap.

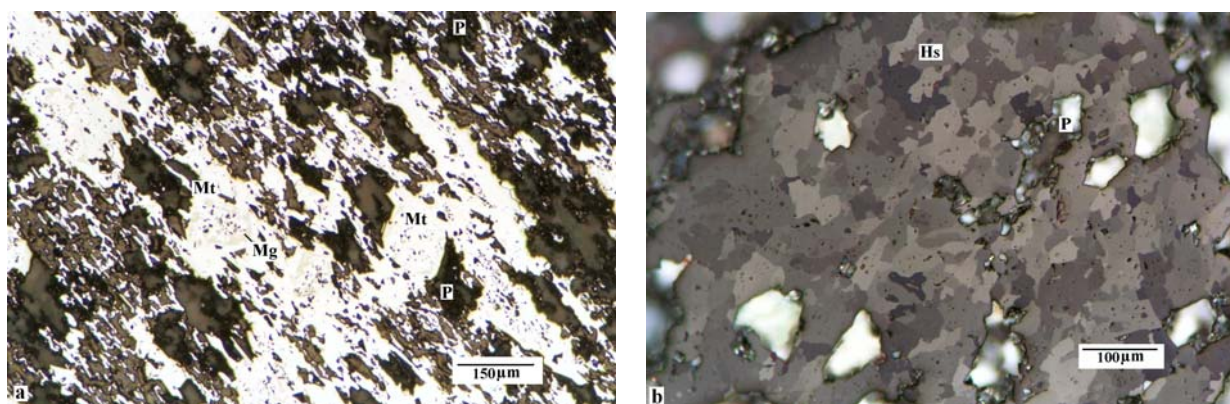


Figura 24: **a** – A amostra apresenta uma orientação enfatizada pela porosidade. Grãos de martita (Mt) micro porosa com relictos de magnetita (Mg) são observados. MOLR, Ap. **b** – Agregados de grãos de hematita sinuosa (Hs). P – poros. MOLR, Lp, Nsc.

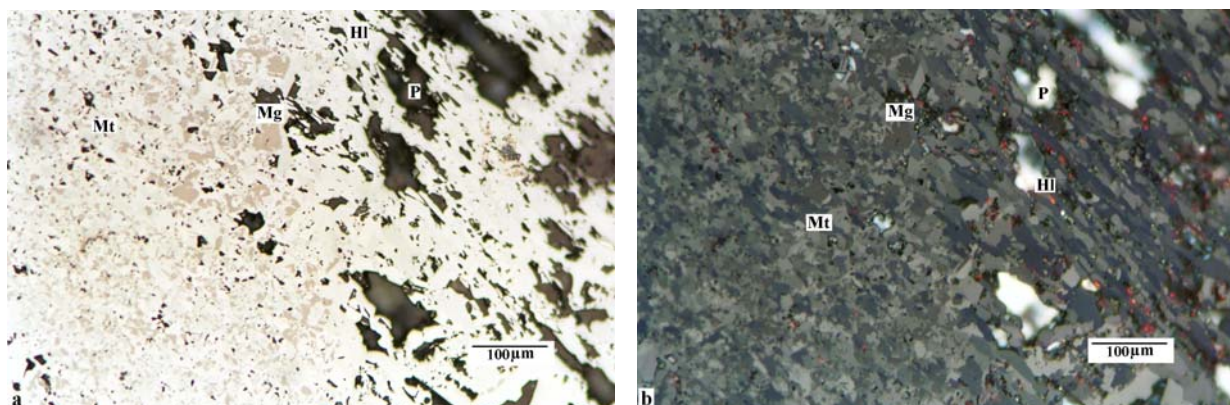


Figura 25: Porções compostas por bandas diferenciadas pelos tipos de hematitas presentes: martita (Mt) com magnetita (Mg) e hematita lamelar (Hl). **a** – MOLR, Ap; **b** – MOLR, Lp, Nsc. P – poros.

AMOSTRA TAM - Tipologia CP

DESCRIÇÃO:

A rocha bandada mostrando algumas porções dobradas. Composta por hematita fina, lamelar com alguma orientação e granular, com grãos de martita dispersos (figura 26a). O contorno destas martitas (8%) está um pouco difuso, mas ainda é possível distinguí-las, e estas algumas vezes mostram estrutura em treliça e micro porosidade resultantes da martitização (figura 26b). A diferença de tamanhos dos grãos de hematita e a porosidade imprimem uma orientação à rocha.

A hematita granular (72%) fina a média predomina (grãos <10µm a 50µm), mostrando ainda agregados de hematita finíssima (micro cristalina) presentes em meio a estes grãos; a hematita lamelar (16%) encontra-se orientada segundo sua maior dimensão (esta varia de 20 a 70µm). Hematita sinuosa (2%) com contatos imbricados, de tamanhos variados também pode ser observada. Localmente, uma porção mais porosa da amostra ocorre, podendo conter material terroso (2%).

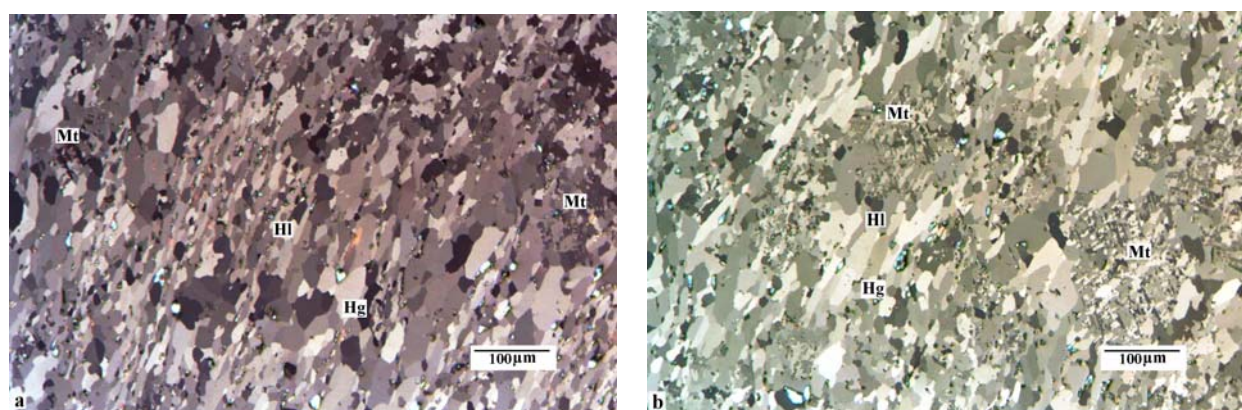


Figura 26: a – Hematita granular (Hg), lamelar (Hl) contendo martita (Mt) dispersa em meio aos agregados de grãos. b – Martita mostrando restos da estrutura em treliça com os limites de grãos um pouco difusos. MOLR, Lp, Nsc.

AMOSTRA JGD - Tipologia CO

DESCRIÇÃO:

Amostra composta por hematita granular (73%) e martita (23%). A hematita granular predomina apresentando tamanhos de grãos mais freqüentes variando entre 10 e 30µm, com estes mostrando formatos regulares equidimensionais e contatos retilíneos, embora algumas lamelas dispersas em meio à hematita granular possam também ser observadas (figura27). A magnetita aparece com 2% e a hematita lamelar também com 2%.

A hematita martítica ocorre na forma de grãos subédricos, mostrando vestígios da estrutura em treliça, contendo magnetita relictas e micro poros, em menor proporção que a hematita granular. Observa-se a presença freqüente de poros.

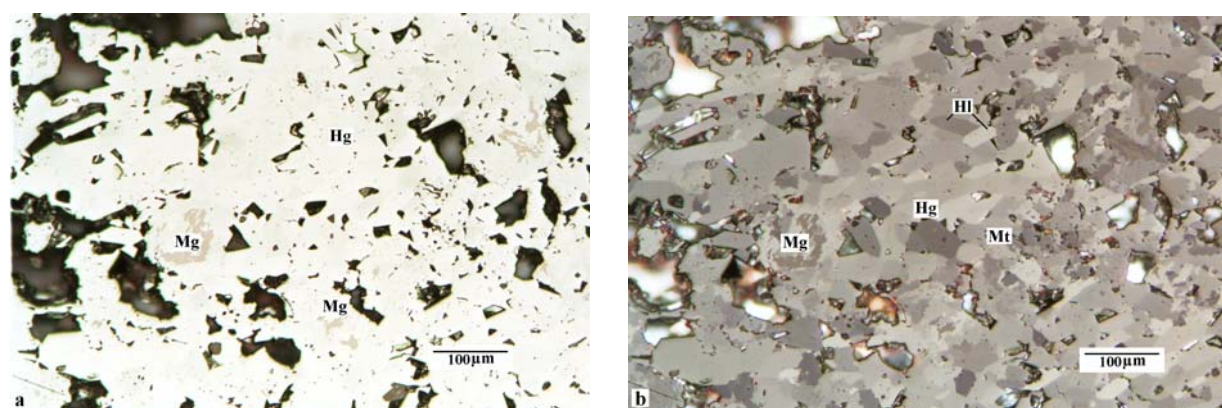


Figura 27: Agregado de grãos de hematita granular e martita com contatos difusos, mostrando uma microporosidade resultante do processo de martitização e magnetita residual. MOLR ; a – Ap; b – Lp, Nsc.

AMOSTRA JGD - Tipologia CA**DESCRIÇÃO:**

Rocha composta por martita (66%), hematita granular (13%), lamelar (6%), goethita (5%) e ainda com presença de carbonato (Cr <1%). A martita predomina em uma porção da rocha e apresenta a estrutura em treliça típica do processo de martitização e magnetita (2%) relicta assim como os micro poros originados do processo (figura 28). Nesta porção observa-se a ocorrência de hematita granular, porém subordinada à martita e ainda a presença da goethita botrioidal circundando a amostra (figura 29a). A rocha apresenta ainda uma porção bastante porosa composta de agregados de hematita sinuosa (8%) como mostrado na figura 29b, com contatos imbricados e formatos irregulares com raríssimos relictos de magnetita e com um micro porosidade incipiente. Na figura 30a o contato entre a hematita sinuosa e hematita granular fina pode ser observado e em 30b hematita lamelar fina na região porosa, associada à hematita sinuosa. Observa-se a presença de hematita lamelar e granular fina em meio a uma matriz goethítica (figura 31a) e ainda porções contendo hematita granular mais grossa (10 a 30µm). O carbonato ocorre em contato com agregados de hematita sinuosa (figura 31b).

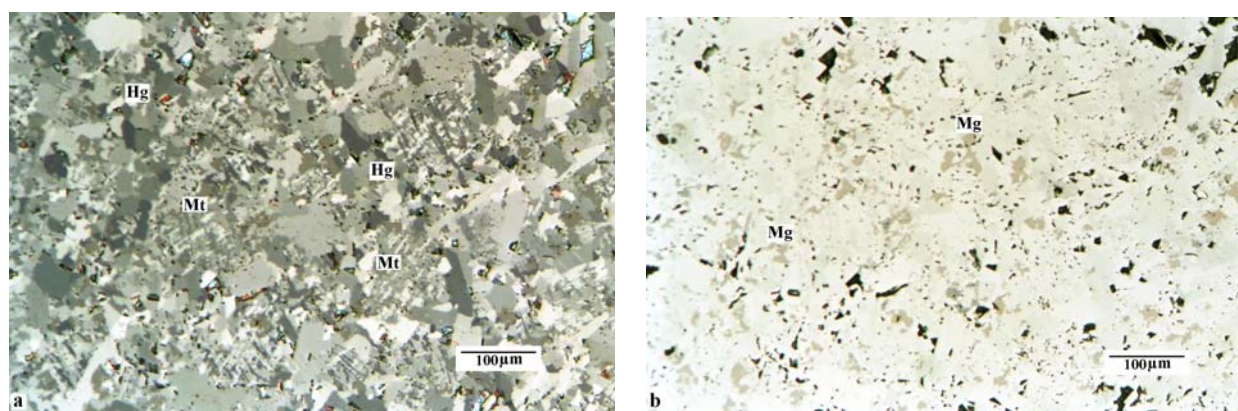


Figura 28: Região com predominância de martita (Mt) com a estrutura em treliça preservada sobre a hematita granular (Hg). MOLR; **a** – Lp, Nsc; **b** – Ap.

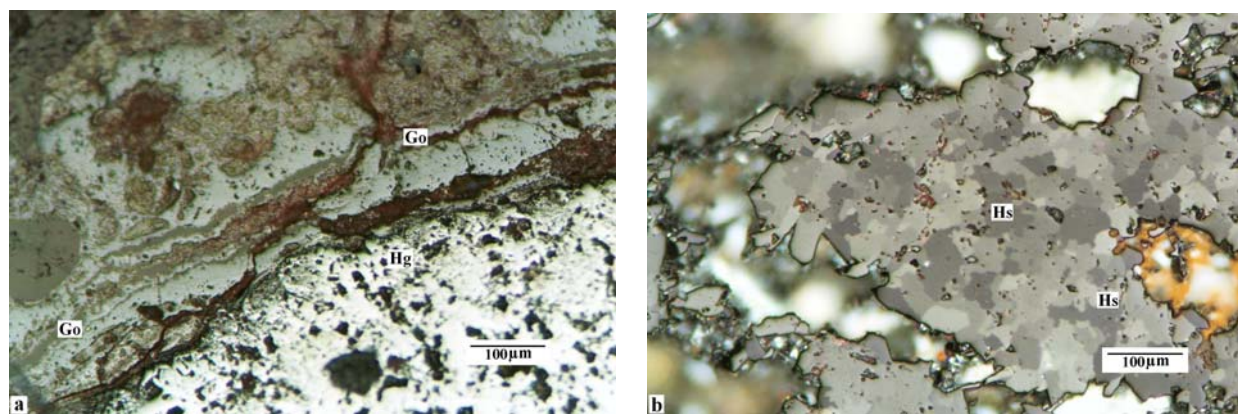


Figura 29: **a** – Goethita botrioidal (Go) circundando agregado de grãos de hematita granular (Hg); MOLR, Ap. **b** – agregado de grãos de hematita sinuosa (Hs) na porção mais porosa da rocha; MOLR, Lp, Nsc.

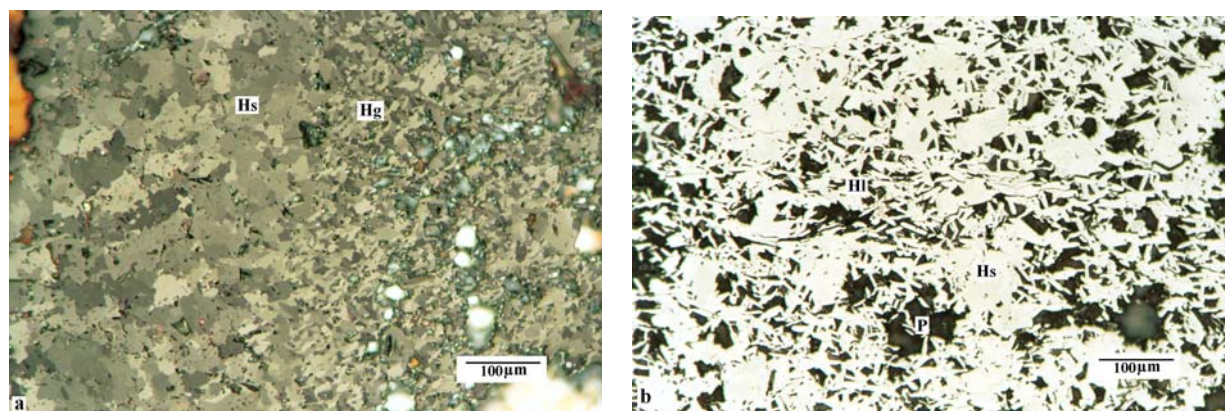


Figura 30: **a** – contato entre uma porção constituída por hematita sinuosa (Hs) e hematita granular (Hg); MOLR, Lp, Nsc. **b** – hematita lamelar (Hl) fina na região porosa contendo agregados de grãos de hematita sinuosa (Hs); MOLR, Ap.

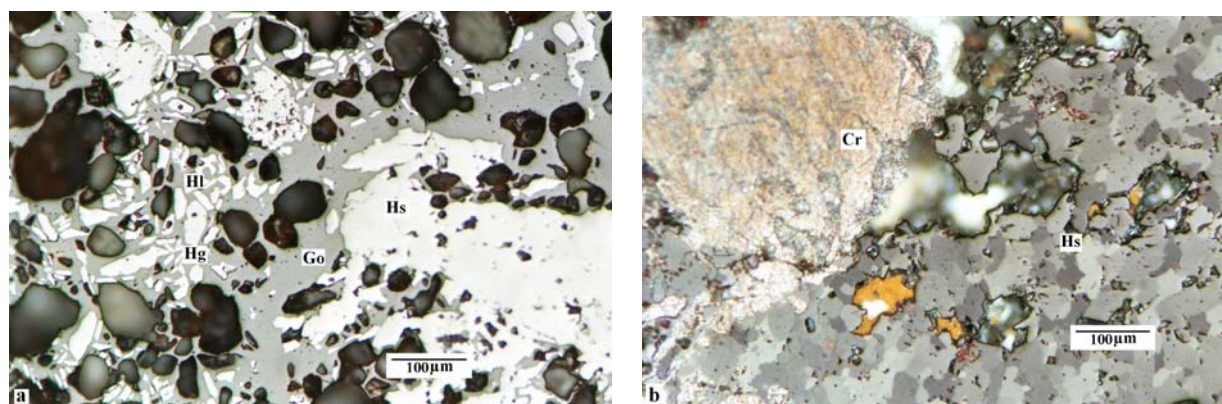


Figura 31: **a** – hematita lamelar (Hl) e granular (Hg) finas dispersas em uma matriz goethítica e agregados de grãos de hematita sinuosa (Hs); MOLR, Ap. **b** – carbonato (Cr) em contato com agregado de grãos de hematita sinuosa (Hs); MOLR, Lp, Nsc.

AMOSTRA JGD -Tipologia PO

DESCRIÇÃO:

Rocha muito porosa (figura 32a) contendo martita (40%), hematita granular (20%) e sinuosa (20%). A martita ocorre extensivamente na amostra (40%), em diferentes etapas do processo de martitização, ou seja, é possível se observar magnetita (17%) em vários estágios de oxidação, desde as mais preservadas até a hematita martítica contendo apenas raros relictos deste mineral (figura 32b). A estrutura em treliça típica que se forma no processo de martitização (lamelas de hematita entrelaçadas) e a micro porosidade resultante podem ser vistos nas figuras 33 a e b. Porções onde a magnetita predomina são freqüentes.

A hematita granular ocorre na forma de agregados de grãos finos de aproximadamente 10µm de tamanho (figura 34).

A hematita sinuosa Hs (3%) pode ser vista formando agregados de grãos que apresentam contatos irregulares, imbricados e que por vezes apresentam vestígios de magnetita (figura 35).

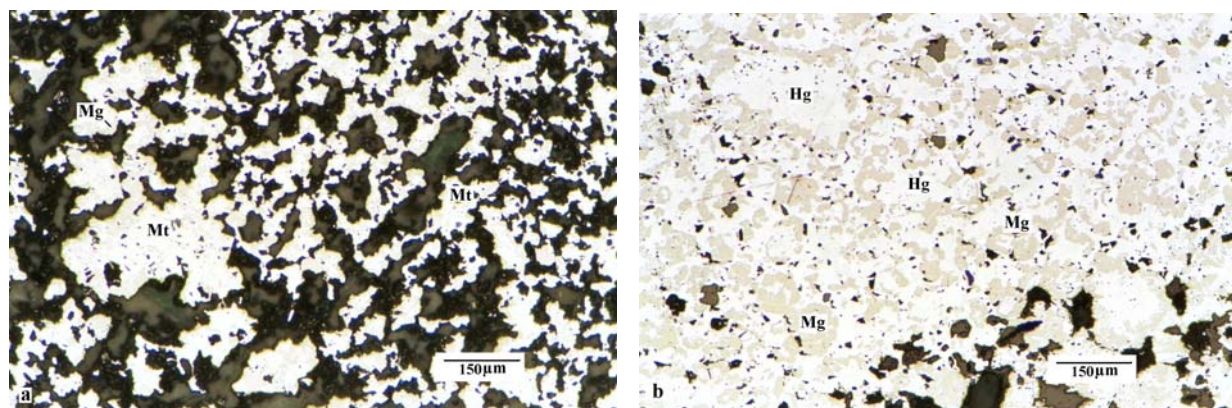


Figura 32: **a** – Região bastante porosa da rocha contendo martita (Mt) e magnetita (Mg) residual; MOLR, Lp, Nsc. **b** – magnetita (Mg) abundante e bem preservada e hematita granular (Hg); MOLR, Ap.

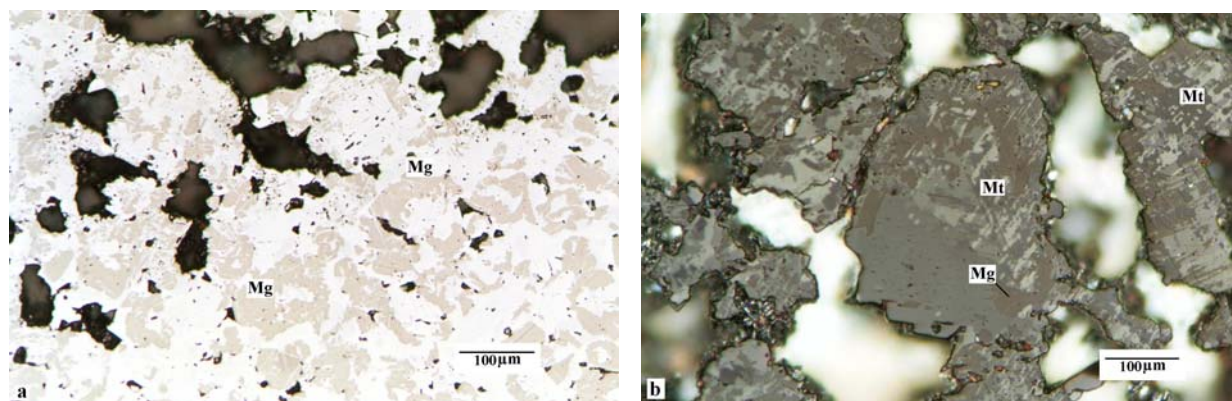


Figura 33: Observa-se magnetita (Mg) abundante e bem preservada na martita (Mt) em MOLR: **a** (Ap) e a estrutura em treliça evidenciada em **b** (Lp, Nsc).

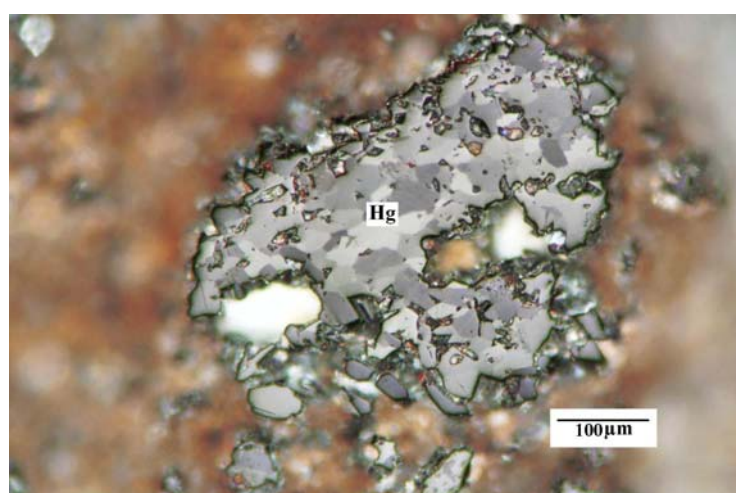


Figura 34: Agregado de grãos de hematita granular (Hg) em uma região porosa da amostra; MOLR, Lp, Nsc.

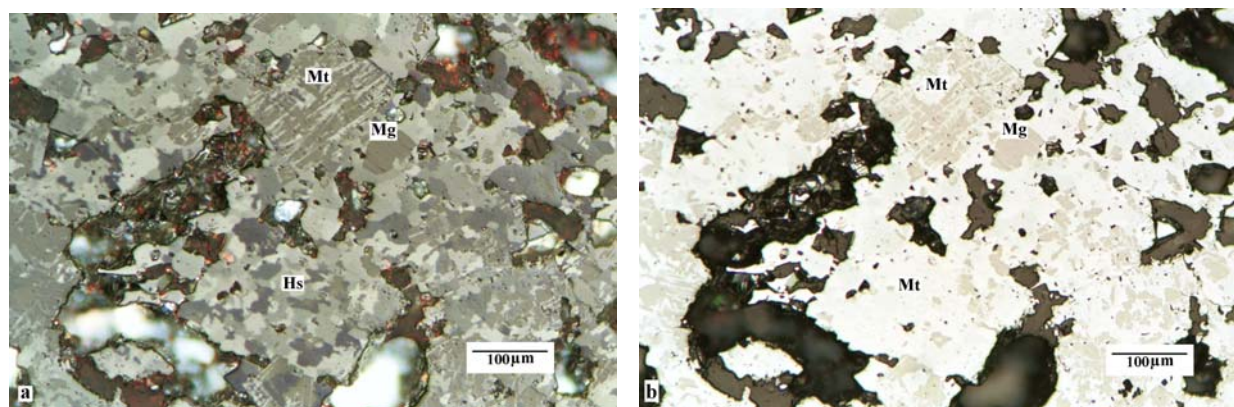


Figura 35: Hematita sinuosa (Hs) associada a martita (Mt) com estrutura em treliça bem preservada e contendo magnetita (Mg) ocupando a maior parte do grão. MOLR; **a** – Lp, Nsc; **b** – Ap.

AMOSTRA JGD - TipologiaCP

DESCRIÇÃO:

A rocha é bastante porosa (figura 36a) e com grande heterogeneidade de tipos de hematita presentes. Apresenta um bandamento marcado pela porosidade, pela presença de fraturas, pela diferença de tamanhos de grãos e ainda pelos diferentes tipos micro estruturais e mineralógicos presentes (figuras 37a). Composta por hematita granular (30%), lamelar (3%), martítica (30%), sinuosa (26%), magnetita (10%) e goethita (1%). A hematita granular fina predomina (entre as hematitas) com grãos de tamanho inferior a 10µm e em algumas porções podendo atingir 15µm (muito comuns). Agregados de tamanho médio (30µm) são também observados (figura 5). A martita é abundante mostrando estrutura em treliça, micro poros e magnetita que em algumas porções só aparece como relictos, e em outras é abundante (figura 37b) apresentado às vezes grãos bem preservados junto à hematita granular e sinuosa. A martita ocorre ainda associada com a goethita e hematita (grão composto pelas três fases) indicando que o processo de martitização resultou em dois produtos (38b). Observa-se ainda martita contendo magnetita associada à goethita.

A hematita sinuosa ocorre na forma de agregados de grãos irregulares de 20µm de tamanho aproximadamente na maioria das vezes (figura 38). A hematita lamelar ocorre localmente mostrando lamelas finas (5µm na maior dimensão).

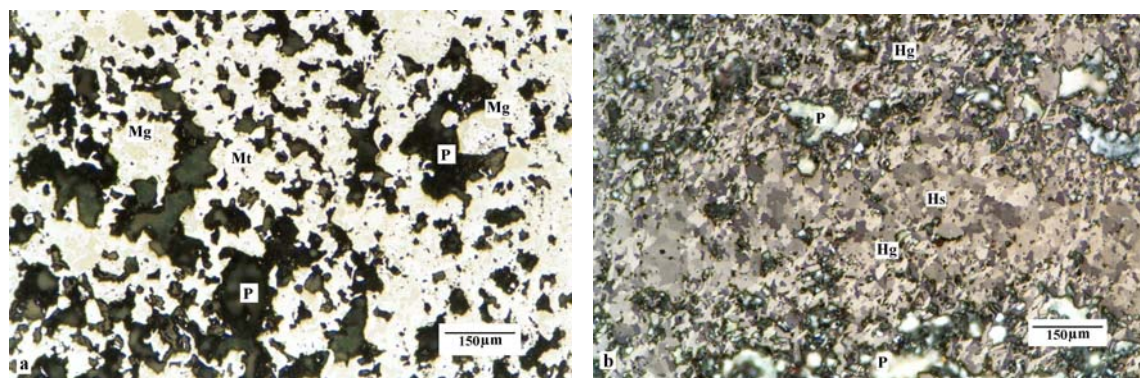


Figura 36: **a** – Região muito porosa (P) contendo martita (Mt) e magnetita (Mg); MOLR, Ap. **b** - bandamento marcado pela diferença de tipos de hematita, granular (Hg) e sinuosa (Hs); MOLR, Lp, Nsc.

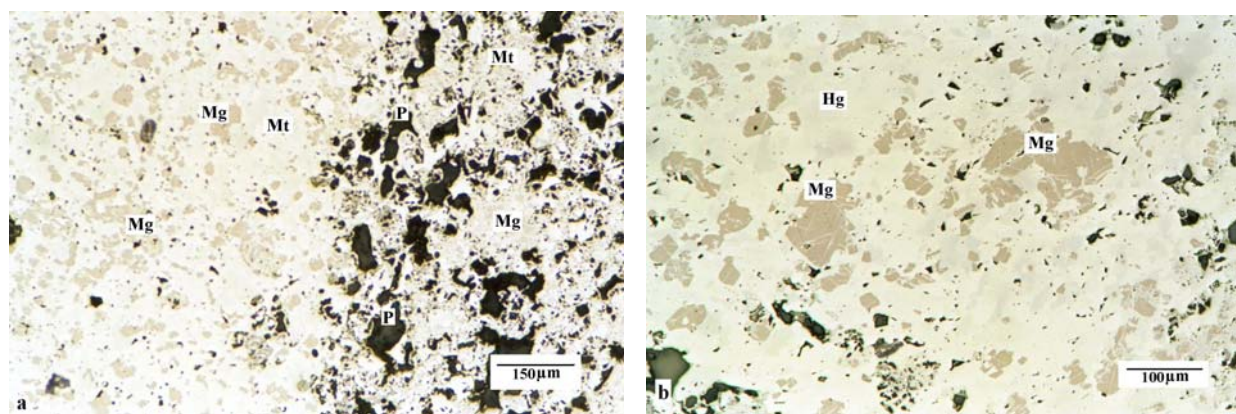


Figura 37: **a** – bandamento evidenciado pela presença da porosidade em uma região e ausente na outra. Mg – magnetita, Mt – martita, P – poros. **b** - Magnetita abundante na martita mostrando restos da estrutura em treliça e micro poros; MOLR, Ap.

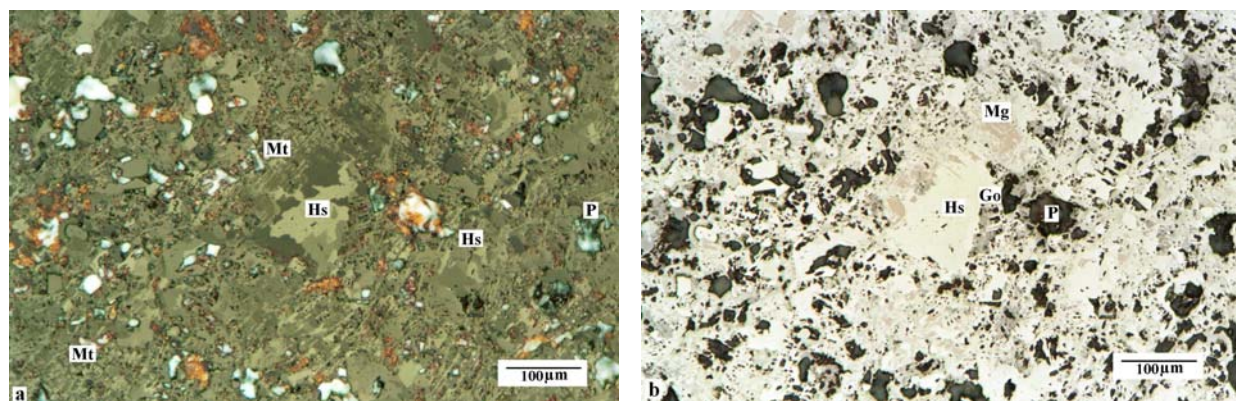


Figura 38: Agregado de grãos de hematita sinuosa (Hs) em meio à região rica em martita (Mt) mostrando a estrutura em treliça e magnetita (Mg) relictas e goethita (Go). P – poros; MOLR: **a**-MOLR,Lp, Nsc; **b** – Ap.

AMOSTRA: POA -TIPOLOGIA CO

DESCRIÇÃO:

A amostra é formada predominantemente por um conjunto compacto (figura 39), composto predominantemente por hematita granular (62%) apresentando grãos de tamanho bastante fino (cerca de 25 μ m); alguns desses grãos são um pouco maiores, chegando a 45 μ m. Esta feição tem porosidade muito baixa (figura 40). Observam-se pequenos conjuntos de poucos grãos de hematita sinuosa (10%) e também relictos de magnetita (10%), associados à martita (10%). Essas feições minoritárias mostram-se dispersas em meio à hematita granular predominante (figuras 39 e 40). Há uma ocorrência moderada, porém nítida de fissuras finas (5 a 10 μ m de largura), que cortam a microestrutura de hematita granular dominante, com vários milímetros de comprimento; atualmente, estas fissuras estão totalmente preenchidas por goethita maciça (figura 40).

Minoritariamente, há regiões bastante porosas (figura 41), em meio a uma microestrutura semelhante à anterior; a porosidade aí pode chegar a 30% e os diâmetros dos poros variam de 5 μ m a 200 μ m.

O bandamento não é nítido nesta amostra.

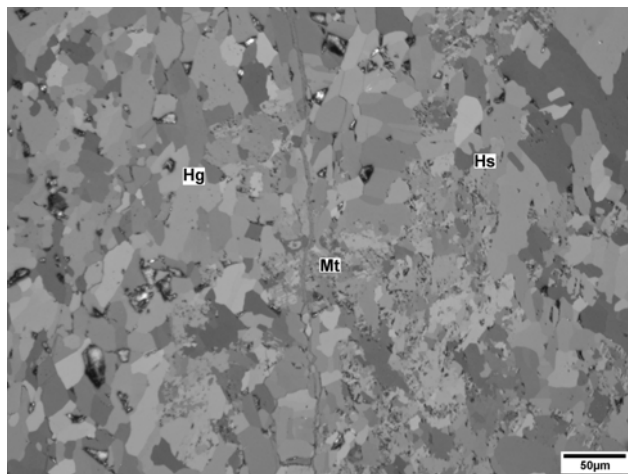


Figura 39 – Conjunto compacto de hematita granular (Hg) com intercalações de martita (Mt) e hematita sinuosa (Hs) minoritária. Um veio fino de goethita corta verticalmente a microestrutura. Microscopia óptica de luz refletida (MOLR), nicóis semicruzados (Nsc).

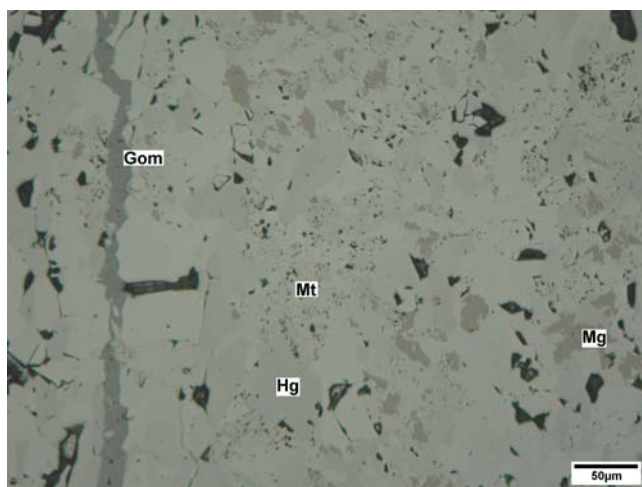


Figura 40 – Conjunto compacto, pouco poroso, de hematita granular (Hg) com intercalações de martita (Mt) e magnetita relict (Mg) minoritárias. Um veio fino de goethita maciça (Gom) corta verticalmente a microestrutura (lado esquerdo). Microscopia óptica de luz refletida (MOLR), apenas polarizador (Ap).

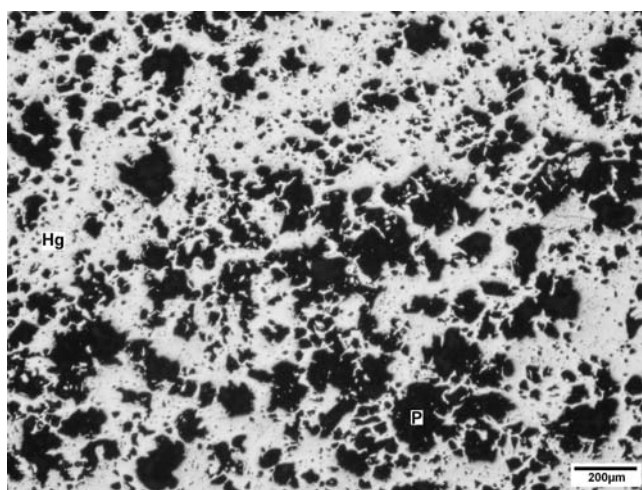


Figura 41 – Conjunto bastante poroso (poros P), composto principalmente de hematita granular (Hg). Microscopia óptica de luz refletida (MOLR), apenas polarizador (Ap).

AMOSTRA: POA – TIPOLOGIA CA

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é muito heterogênea e porosa. A feição dominante é a goethita botrioidal (58%) porosa (figura 42), às vezes mostrando trama alveolar (figura 45). Com bastante frequência, a goethita botrioidal passa a goethita terrosa (figura 42). Comumente notam-se cúmulos ou grandes grupos de hematita (figuras 42 a 45) granular (25%), contendo também (figura 44) hematita lamelar (5%) e, mais raramente, hematita sinuosa (1%). Estes grupos de hematita estão envolvidos pela goethita botrioidal (figuras 42 e 45). Mesmo as regiões com predominância de hematita são relativamente porosas (Figura 43). Frequentemente observam-se grupos de hematita granular e lamelar envolvidas por películas de goethita botrioidal maciça (7%) (figura 43). Martita (2%) e magnetita relictas (1%) são relativamente raras. Também escasso é o quartzo (1%), ocorrendo como grão simples, envolvidos pela goethita (figura 42). O bandamento é pouco nítido nesta amostra.

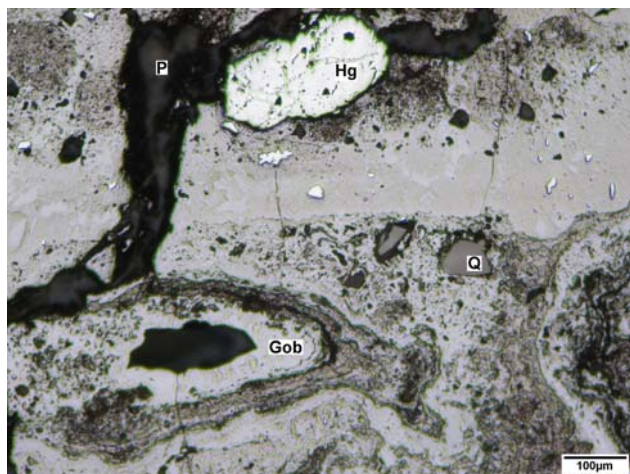


Figura 42 – Goethita botrioidal (Gob) bastante porosa (poros P), envolvendo grupo de grãos de hematita granular (Hg) e cristais isolados de hematita lamelar e quartzo (Q). Há regiões da goethita que mostram aspecto terroso (cores cinza mais escuro e amarronzado). MOLR, Ap.

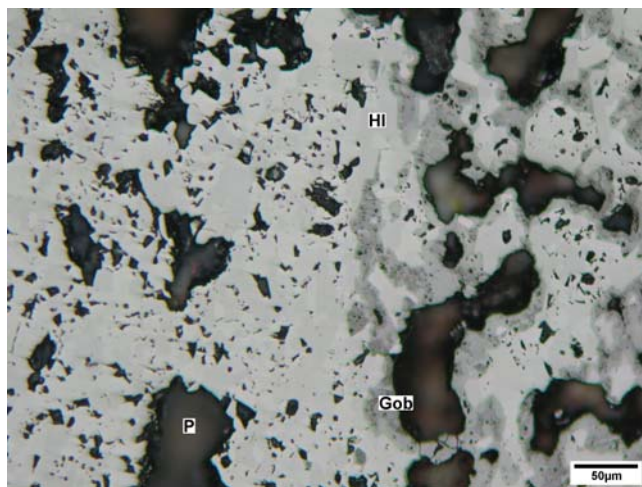


Figura 43 – Região com predominância de hematitas granular e lamelar (HI) e grande incidência de poros (P). Os grãos e grupos de hematita à direita acham-se envoltos por películas e finas bolsas de goethita botrioidal (Gob) maciça. MOLR, Ap.

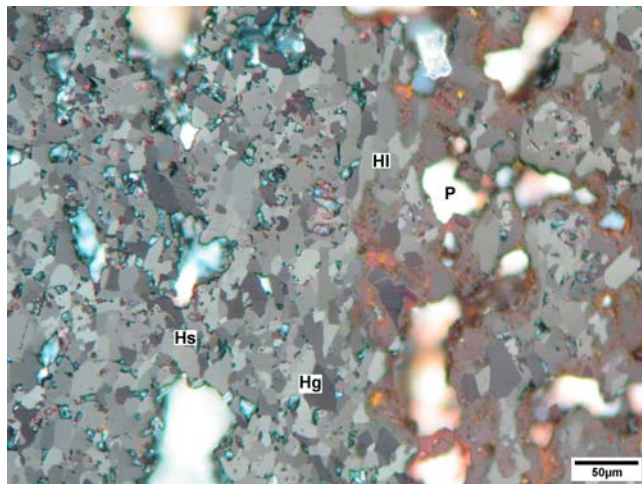


Figura 44 – Mesma área da foto anterior, com nicóis semicruzados. As variedades da hematita mostram-se mais evidentes: granular (Hg), lamelar (HI) e sinuosa (Hs). MOLR, Nsc.

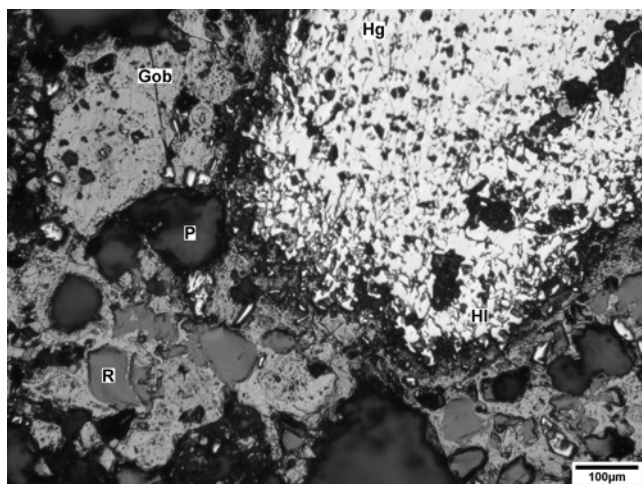


Figura 45 – Goethita botrioidal (Gob) muito porosa, inclusive com trama alveolar (parte inferior), envolve grande grupo de hematita principalmente granular (Hg) e lamelar (HI). Os

poros ainda abertos (P) e preenchidos pela resina de impregnação (R) são muito abundantes. MOLR, Ap.

AMOSTRA: POA - TIPOLOGIA PO

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é constituída predominantemente por grupos de hematita lamelar (54%), intercrescida com hematita granular (28%) e sinuosa (5%) (figuras 46 e 47). O bandeamento da rocha é bem nítido, pela orientação da hematita lamelar (figura 47) e por lineamentos (figura 48) de poros e de grãos de quartzo (4%) relativamente raros. A martita ocorre com cerca de 7%, associada à magnetita relictas (2%). Não se detectou goethita.

A porosidade é mediana (figura 46), mas a amostra é relativamente heterogênea em relação a áreas hematíticas mais e menos porosas (figura 48).

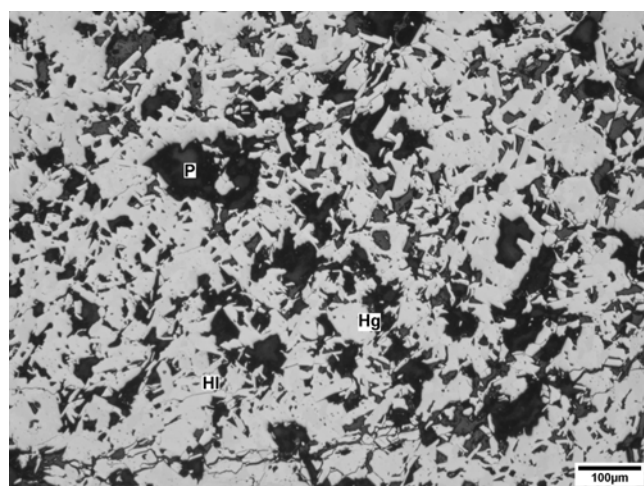


Figura 46 – Conjunto medianamente poroso de hematita, com predominância da lamelar (HI), com presença minoritária das variedades granular (Hg), sinuosa (Hs) e martita. MOLR, Ap.

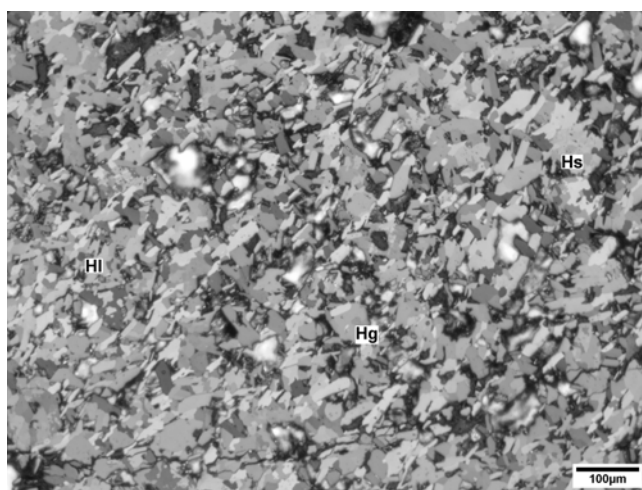


Figura 47 – Mesma área da foto anterior, com nicóis semicruzados. As variedades da hematita mostram-se mais evidentes: lamelar (Hl), granular (Hg) e sinuosa (Hs). MOLR, Nsc.

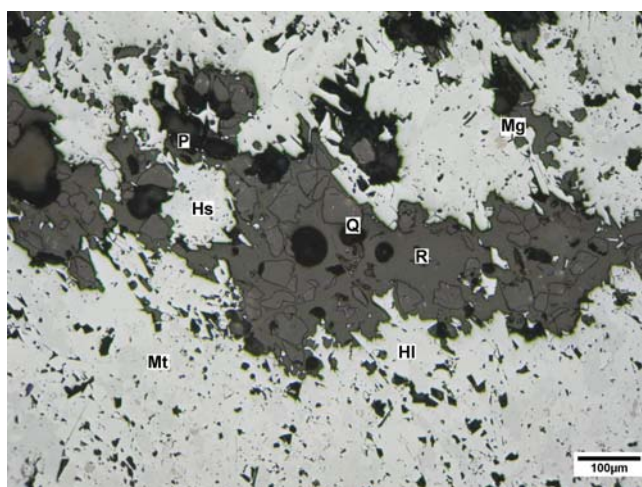


Figura 48 – A área inferior compõe-se de um conjunto compacto de hematita lamelar (Hl) dominante, com martita (Mt) média e hematita sinuosa (Hs) rara. Na parte central há um leito poroso (P, R), contendo alguma hematita e algum quartzo (Q). Na parte superior, a microestrutura de hematita é mais porosa e a presença de martita e magnetita (Mg) relictas também é maior, mas ainda com hematita lamelar majoritária. MOLR, Ap.

AMOSTRA: POA TIPOLOGIA CP

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é composta essencialmente por hematita, em suas várias feições (figura 49). A hematita granular é a dominante (50%), normalmente intercrescida com as feições lamelar (25%), sinuosa (7%) e martita (5%) (figuras 49 e 50). A magnetita relictas é baixa (5%), mas distribuída uniformemente (figuras 49 e 52). O quartzo (8%) ocorre localmente em leitos, associado à hematita lamelar, martita e magnetita (figuras 51 e 52). A porosidade varia de baixa a média e ocorre tanto nas áreas essencialmente hematíticas como nas mais quartzosas (figuras 49, 51 e 52). Os diâmetros dos poros variam de 2µm a 150µm. O bandeamento está marcado mais pelos lineamentos de quartzo e poros (figura 52) do que pela hematita lamelar, que usualmente tem orientação tendendo para aleatória.

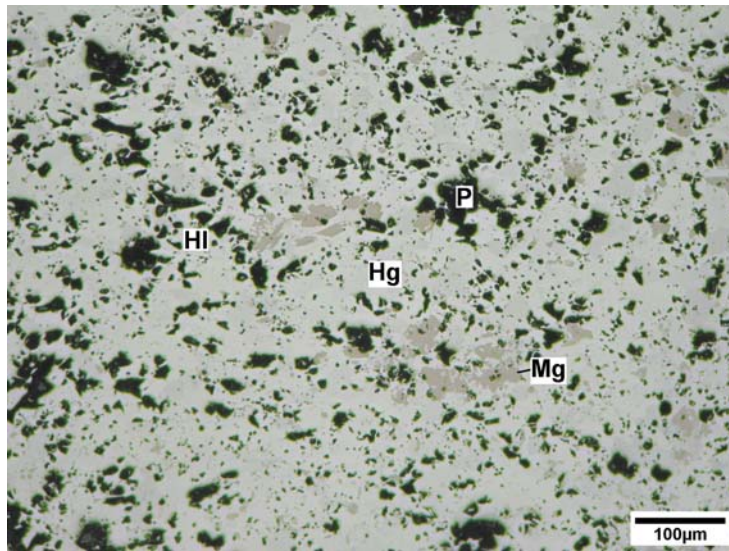


Figura 49 – Conjunto compacto, medianamente poroso (poros P), de hematita granular (Hg) com intercalações de hematita lamelar (Hl), sinuosa e magnetita relict (Mg) minoritárias. MOLR, Ap.

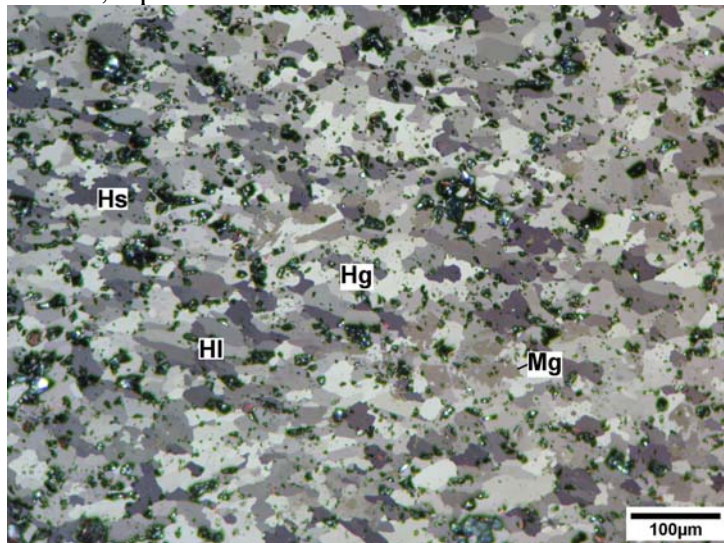


Figura 50 – Mesma área da foto anterior, com nicóis semicruzados. As variedades da hematita mostram-se mais evidentes: granular (Hg), lamelar (Hl) e sinuosa (Hs); também magnetita (Mg) está presente. MOLR, Nsc.

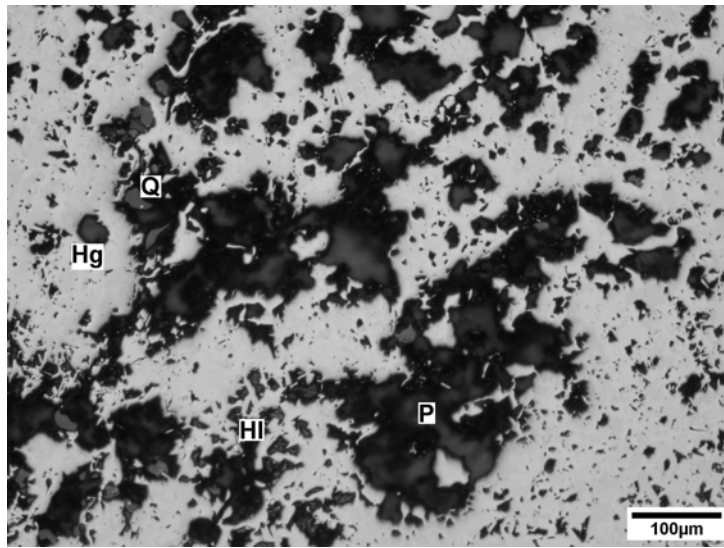


Figura 51 – Área mais porosa (poros P) contendo principalmente hematitas granular (Hg) e lamelar (HI). Alguns grãos de quartzo ocorrem nestas regiões porosas. MOLR, Ap.

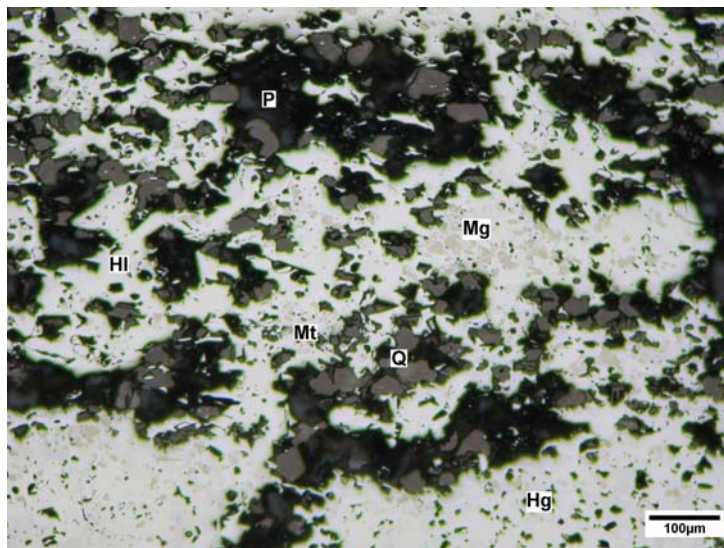


Figura 52 – Área bastante porosa (poros P) contendo principalmente hematitas granular (Hg) e lamelar (HI); magnetita (Mg) e martita (Mt) ocorrem em concentração média, assim como quartzo (Q). Alguns grãos de quartzo ocorrem nestas regiões porosas. MOLR, Ap.

AMOSTRA: POA TIPOLOGIA IB**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra é muito quartzosa (quartzo 48%), mostrando ser, de fato, um itabirito, com bandejamento nítido (figura 53). Os grãos de quartzo são geralmente alongados (figura 53), com as dimensões médias de 45 μ m x 80 μ m. A feição dominante da hematita é a martita (33%) (figuras 53, 54 e 55), seguida pela hematita lamelar (5%). Os grãos de martita mostram-se tanto isolados (figura 53) como em grupos (figura 55); o diâmetro médio dos grãos é 55 μ m. Magnetita (5%) relictiva ocorre evidentemente associada à martita (figura 55). Goethita botrioidal (8%) aparece geralmente relacionada à martita, freqüentemente como películas e bolsas envolvendo grãos de martita (figura 53) e, mais raramente, como inclusões orientadas nesta; a goethita botrioidal, com alguma freqüência, mostra trama alveolar (figura 54). Raramente, goethita terrosa (1%) aparece relacionada à goethita botrioidal. A porosidade é moderadamente baixa e os diâmetros dos poros variam de 2 μ m a 150 μ m.

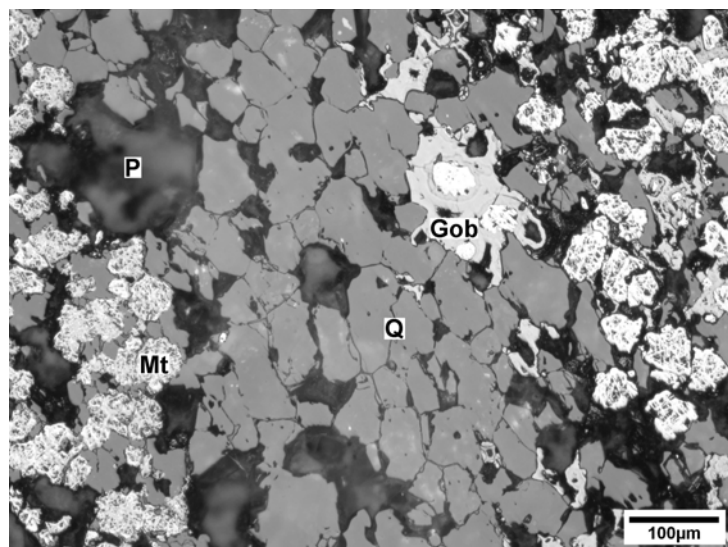


Figura 53 – Um leito de grãos de quartzo (Q) corta diagonalmente a foto e trechos ricos em martita (Mt) situam-se nas suas margens. Goethita botrioidal (Gob), como películas e bolsas, envolve grãos de martita, como na parte central superior. Os poros (P) têm dimensões pouco variadas. MOLR, Ap.

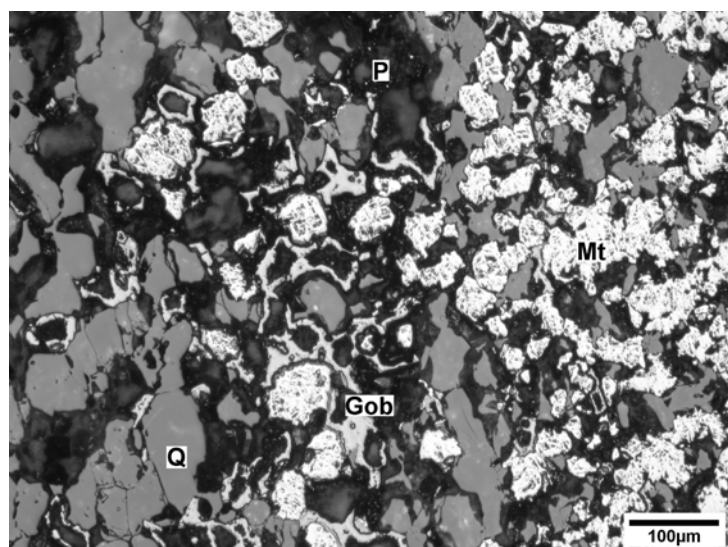


Figura 54 – Área com predominância de quartzo (Q) e com quantidade média de martita (Mt). A goethita botrioidal (Gob) envolve grãos de martita. As películas de goethita botrioidal também formam anéis, ocos ou envolvendo goethita terrosa, caracterizando a trama alveolar. MOLR, Ap.

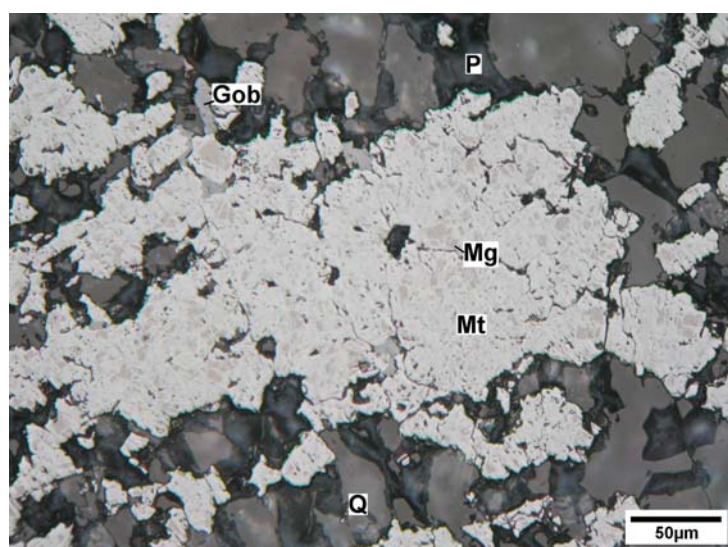


Figura 55 – Área com predominância de martita (Mt) com magnetita (Mg) relict. Cristais de quartzo (Q) envolvem o grupo de grãos de martita e a goethita botrioidal é rara. MOLR, Ap.

AMOSTRA: VGR Tipologia CO

DESCRIÇÃO:

A amostra é formada predominantemente por um conjunto compacto (figura 56), composto predominantemente por hematita granular (65%) apresentando grãos de tamanho bastante fino (cerca de 25µm); alguns desses grãos são um pouco maiores, chegando a 45µm. Observam-se concentrações localizadas e leitos finos juntos de hematita lamelar (25%) (figura 57) e também relictos muito pequenos ($\approx 5\mu\text{m}$) de magnetita (3%), associados à martita (7%). Essas feições minoritárias mostram-se dispersas em meio à hematita granular predominante (figuras 56 e 57). A porosidade varia de pouco porosa (10%) (figura 56) a regiões bastante porosas chegando a

35% (figura 57); os diâmetros dos poros variam de 5 μ m a 250 μ m. A microestrutura hematítica não varia com a porosidade.

O bandamento é medianamente nítido e marcado pelos leitos de hematita lamelar e por alinhamentos de poros.

AMOSTRA: VGR Tipologia CA

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é medianamente heterogênea e porosa. Há duas feições dominantes:

1) leitos finos de hematita lamelar e granular, alternando com goethita botrioidal bastante porosa (figura 58), às vezes mostrando trama alveolar; há incidência baixa de goethita terrosa (figura 58); 2) feição dominada pela martita bastante euédrica, mas praticamente sem relictos de magnetita, mas com presença significativa de hematita lamelar, (figura 59). Há ocorrência rara, mas conspícua de gibbsita (figura 60) em grãos subédricos, com diâmetro médio de \approx 120 μ m; a gibbsita ocorre associada à goethita (botrioidal e terrosa).

Os diâmetros dos poros variam de 2 μ m a 600 μ m; a porosidade média é de 30%, sendo a primeira feição a mais porosa. Fases minerais presentes: hematita lamelar (35%), hematita granular (20%), martita (27%), goethita botrioidal (13%), goethita terrosa (2%) e gibbsita (3%).

O bandamento é muito nítido nesta amostra.

AMOSTRA: VGR Tipologia PO

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é bastante heterogênea e constituída predominantemente por grupos de hematita lamelar, intercrescida com hematita granular e martita (figura 61). O bandamento da rocha é bem nítido (figura 61), pela orientação da hematita lamelar, por bandas hematíticas e martíticas e por lineamentos de poros.

Há ocorrência rara, mas conspícua de gibbsita (figura 62) em grãos subédricos a euédricos, com diâmetro médio de \approx 100 μ m; a gibbsita ocorre associada à hematita (todas as variedades) em áreas porosas, localizando-se como veios (figura 62) e bolsas. O quartzo é muito raro.

Os diâmetros dos poros variam de 2 μ m a 600 μ m; a porosidade média é de 30%, sendo a primeira feição a mais porosa.

Fases minerais presentes: hematita lamelar (44%), hematita granular (17%), martita (30%), magnetita relictiva (5%), goethita (1%) e gibbsita (3%).

O bandamento é muito nítido nesta amostra.

AMOSTRA: VGR Tipologia CP

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é formada predominantemente por um conjunto compacto (figura 63), composto predominantemente por hematita granular (50%) apresentando grãos de tamanho bastante fino (cerca de 25 μ m); alguns desses grãos são um pouco maiores, chegando a 45 μ m; há ocorrência minoritária de hematita sinuosa (5%). Observam-se concentrações lenticulares localizadas de

hematita lamelar (35%) (figura 63), em geral com lamelas bem pequenas ($5\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$); os eixos destas lentes não coincidem com o bandamento do minério. Há ainda bandas e intercalações de hematita lamelar de tamanho normal ($10\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$). Notam-se também relictos muito pequenos ($< 10\mu\text{m}$) de magnetita (3%), associados à martita (7%). A porosidade varia de pouco porosa (10%) a regiões bastante porosas chegando a 35%; os diâmetros dos poros variam de $5\mu\text{m}$ a $350\mu\text{m}$. A microestrutura hematítica não varia muito com a porosidade. O bandamento é medianamente nítido e marcado pelos leitos de hematita lamelar e por alinhamentos de poros.

AMOSTRA: LO CPX CO

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é formada por duas microestruturas muito diferentes:

a) um conjunto compacto (figura 64), composto predominantemente por hematita microcristalina apresentando grãos de tamanho muito fino (cerca de $3\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$ a $5\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$); estes conjuntos envolvem grupos de hematita de tamanho normal ($30\text{-}45\mu\text{m}$) (figura 64); parte minoritária destes grupos é composta de hematitas granular e sinuosa, com alguma hematita lamelar, mas a maioria é composta por martita compondo pseudomorfos de porfiroblastos de magnetita (figura 65). Estes grupos de hematita de granulação normal têm cerca de $150\mu\text{m}$, raramente chegando a $250\mu\text{m}$. São geralmente equidimensionais, mas também mostram formas alongadas, mais raramente.

b) regiões formadas quase exclusivamente por hematita lamelar (25 a $50\mu\text{m}$), com pouca hematita granular (%) disseminada, com o tamanho normal das tramas hematíticas.

A porosidade é baixa (10%) na região de trama fina, e os diâmetros dos poros variam de $5\mu\text{m}$ a $40\mu\text{m}$; há 15% de porosidade naquela com trama normal a porosidade média é de 20%. O bandamento é medianamente nítido e marcado pela orientação da hematita lamelar e por alinhamentos de poros.

A abundância das feições mineralógicas, no conjunto da amostra, é a seguinte: hematita microcristalina (40%), hematita lamelar (40%), hematita granular (8%), hematita sinuosa (4%), martita (8%).

AMOSTRA: LO CPX PO

DESCRIÇÃO:

Esta amostra também é formada por duas tramas bastante diferentes:

a) composta por grupos de hematitas granular e sinuosa, com alguma hematita lamelar, mas a metade é formada por martita, inclusive compondo pseudomorfos de porfiroblastos de magnetita (figura 66); a porosidade média é de 30%, e os diâmetros dos poros variam de $5\mu\text{m}$ a $500\mu\text{m}$;

b) constituída por fragmentos de bandas orientadas de hematitas granular e sinuosa (minoritária), com alguma hematita lamelar (figura 67), envoltos por áreas compostas de hematita lamelar pulverulenta desarticulada (%); grãos normais e cristalitos de hematita lamelar acham-se distribuídos com pouca orientação e são ligados por um cimento composto de material argiloso, com goethita terrosa, gibbsita e calcedônia (de silicificação). A porosidade média é de 20%, mas sua distribuição é muito heterogênea; nas áreas mais porosas, os poros podem chegar a $700\mu\text{m}$, mas a média é de $100\mu\text{m}$.

Há ocorrência rara, mas conspícua de gibbsita (figura 68) em grãos subédricos, com diâmetro médio de $\approx 40\mu\text{m}$; a gibbsita ocorre associada à goethita terrosa, nas áreas mais porosas. Os

diâmetros dos poros variam de 2 μ m a 600 μ m; a porosidade média é de 30%, sendo a primeira feição a mais porosa.

Composição de feições mineralógicas, no conjunto da amostra: hematita lamelar (35%), hematita granular (24%), hematita sinuosa (4%), martita (30%), goethita terrosa (3%) e gibbsita (4%); quartzo é muito raro (<1%).

O bandamento é muito nítido nesta amostra, marcado por bandas de hematita e por alinhamentos de poros.

AMOSTRA: LO CPX CA

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é muito heterogênea e porosa: a porosidade média é de cerca de 35%, mas varia desde 10% até 55%. A feição dominante é a goethita botrioidal (40%) porosa (figura 69), às vezes mostrando trama alveolar. Com bastante frequência, a goethita botrioidal passa a goethita terrosa (15%), onde há também alguma presença de gibbsita (2%). Comumente notam-se cúmulos e grandes bandas de hematita (figura 69) lamelar (25%), contendo também hematita granular (12%) e, mais raramente, hematita sinuosa (2%). Estes grupos de hematita estão normalmente envolvidos e/ou separados por bandas goethita botrioidal (figura 70); localmente, algumas destas regiões hematíticas contêm pouca goethita; algumas destas áreas com predominância de hematita são pouco porosas (figura 70). Martita (3%) e quartzo (1%) são relativamente raros. Os diâmetros dos poros variam de 2 μ m a 700 μ m, mas a média fica em cerca de 150 μ m.

O bandamento é nítido nesta amostra.

AMOSTRA: LO CPX CP

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é muito porosa e consiste por uma alternância de bandas com predomínio de hematita microcristalina, apresentando grãos de tamanho muito fino (cerca de 3 μ m x 7 μ m a 5 μ m x 10 μ m), com regiões compostas por hematita granular (figura 71); esta última tem tamanho dominante usual (\approx 25 μ m), mas há agregados com tamanho de grão maior (até 50 μ m) (figura 72). As bandas de hematita microcristalina são bem mais porosas que as de hematita granular, mas estas também têm porosidade significativa. A porosidade média é de 35%, mas localmente chega a 50%. Nas áreas mais porosas, ricas em hematita microcristalina, há ocorrência moderada de goethita terrosa; esta parece conter, localmente, miniáreas contendo mineral de manganês, também terroso. Há ocorrência minoritária de Hl, em ripas pequenas e associadas à Hm. Há ocorrência de jacobsita, de cor marrom-amarelada, intimamente intercrescida com Hg (figura 72) e às vezes associada à Hm; seus grãos são subédricos a anédricos, com diâmetro de 5 a 120 μ m, com média em 80 μ m. Muitos dos grãos de jacobsita contêm inclusões de hematita, tanto anédricas como euédricas (figura 73); embora minoritária, a jacobsita é localmente concentrada, onde predomina sobre a hematita. As partículas ricas em jacobsita são nitidamente ferromagnéticas.

Os diâmetros dos poros variam de 2 μ m a 500 μ m, mas a média fica em cerca de 100 μ m.

O bandamento é nítido nesta amostra, pela sucessão de leitos de Hg e Hm.

Composição de feições mineralógicas: hematita granular (42%), hematita microcristalina (40%), hematita lamelar (5%), goethita terrosa (3%), jacobsita (10%).

→ Fase marrom-amarelada: jacobsita – espinela do grupo da magnetita (cúbica);

fórmula: $(\text{Mn}^{++}, \text{Fe}^{++}, \text{Mg})(\text{Fe}^{+++}, \text{Mn}^{+++})_2\text{O}_4$.

AMOSTRA: LO CPX PM

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é bastante heterogênea e porosa. É constituída predominantemente por grupos de hematita lamelar, intercrescida com hematita granular e hematita microcristalina (figura 74). Há abundância média (figura 75), de áreas compostas de hematita lamelar pulverulenta desarticulada, que envolve a hematita lamelar de tamanho normal. Os cristalitos desta hematita lamelar fina acham-se distribuídos com alguma orientação e são ligados por um cimento composto de material terroso, com goethita terrosa e gibbsita fina.

Ocorrem também regiões com baixa porosidade, associadas a áreas de Hl e Hg mais grossas. Contudo, estas mesmas feições também ocorrem em regiões porosas, parcialmente desagregadas, envoltas principalmente por Hl fina e Hm, com gibbsita e pouca goethita terrosa.

Há ocorrência significativa de gibbsita não terrosa, em grãos subédricos a euédricos, com diâmetro médio de $\approx 70\mu\text{m}$; esta gibbsita mais grossa ocorre associada à hematita, principalmente à lamelar fina e à goethita terrosa, em áreas porosas, localizando-se como veios e bolsas. O quartzo é relativamente raro, ocorrendo em grãos maiores do que o normal ($200\mu\text{m}$ até $1200\mu\text{m}$). Os diâmetros dos poros variam de $2\mu\text{m}$ a $400\mu\text{m}$ e a porosidade média é de 30%.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (50%), hematita granular (20%), hematita microcristalina (10%), hematita sinuosa (3%), goethita terrosa (4%), gibbsita (12%) e quartzo (1%).

O bandamento da rocha não é nítido.

AMOSTRA: LO CPX <6,30 > 1,00mm

DESCRIÇÃO:

Esta amostra apresenta partículas, na fração entre 6,30 e 1,00mm, que mostram ser uma síntese das características das amostras CPX-CP e CPX-PM, com predomínio da primeira.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (40%), hematita granular (22%), hematita microcristalina (20%), hematita sinuosa (2%), goethita botrioidal (3%), goethita terrosa (3%), gibbsita (6%) e quartzo (1%); jacobsita (2%); criptomelana-pirolusita (1%).

A porosidade é de cerca de 25%.

AMOSTRA: LO CPX < 1,00mm

DESCRIÇÃO:

Esta amostra apresenta partículas, na fração menor que 1,00mm, que mostram ser uma síntese das características das amostras CPX-CP e CPX-PM, com predomínio da primeira.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (38%), hematita granular (22%), hematita microcristalina (18%), hematita sinuosa (2%), goethita botrioidal (3%), goethita terrosa (4%), gibbsita (7%) e quartzo (1%); jacobsita (3%); criptomelana-pirolusita (2%).

A porosidade é de aproximadamente 20%.

AMOSTRA: PO B PIC – CO**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra é composta predominantemente por hematita lamelar (Hl). Algumas partículas contêm muito quartzo, constituindo verdadeiros itabiritos; outras são compostas quase exclusivamente por Hl, portanto com muito pouco quartzo. Os outros minerais de ferro são minoritários. Nos fragmentos de itabirito, a Hl envolta pelo quartzo mostra usualmente placas relativamente pequenas, com 10µm x 30µm. Nas partículas com pouco quartzo, a Hl tem dimensões normais (15µm x 50µm). Em todos os casos, o quartzo tem cerca de 30µm de diâmetro.

A porosidade é baixa no itabirito e média inferior nas partículas hematíticas (média de ≈10%);

As dimensões dos poros variam de 3 a 200µm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (55%), hematita granular (5%), martita (16%), goethita botrioidal (1%), magnetita relictica (3%), e quartzo (20%);

O bandamento da rocha é pouco nítido.

AMOSTRA: PO B PIC – CP**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra é medianamente heterogênea, principalmente em relação à distribuição dos poros, pois há regiões pouco porosas (≈10%), não muito distantes de outras mais porosas (≈20%); o diâmetro médio dos poros fica em cerca de 250µm, mas há alguns com até 800-1000µm. A feição dominante é a hematita lamelar (Hl), mas há ocorrência significativa de hematita granular (Hg), com alguma hematita sinuosa (Hs). As áreas ricas em Hg distribuem-se também com alguma heterogeneidade em relação às áreas dominantes de Hl. Há presença significativa de magnetita (Mg) relictica e de martita (Mt) em ambos os tipos de área. Às vezes, a Mt ocorre como grãos maiores, pseudomorfos segundo a Mg. O quartzo (Q) é relativamente raro e às vezes aparece em grãos muito grandes (até 500µm) em regiões porosas. A gibbsita também é relativamente rara e ocorre nas regiões de poros médios e pequenos. Os minerais portadores de ferro mostram dimensões normais, em geral.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (60%), hematita granular (21%), hematita sinuosa (3%), martita (10%), magnetita relictica (3%), gibbsita (1%), goethita (<1%) e quartzo (2%);

O bandamento da rocha é pouco nítido.

AMOSTRA: PO B PIC – PO**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra apresenta grandes poros, até milimétricos, mas as regiões entre estes poros são muito compactas, só mostrando poros pequenos (< 35µm). A porosidade total é de cerca de 30%. Os tamanhos das feições dominantes, Hg e Hl são normais.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (40%), hematita granular (45%), hematita sinuosa (3%), martita (5%), magnetita relictica (3%), gibbsita (1%), goethita (1%) e quartzo (2%);

O bandamento da rocha é pouco nítido.

AMOSTRA: PO B PIC – CA**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra é bastante porosa (cerca de 30%) com a média de 350µm de diâmetro. Sua heterogeneidade não está na distribuição dos poros, mas sim na de goethita, com áreas muito ricas em Gob, alternando-se com outras com predominância de Gt. A Gob apresenta trama rendilhada, com microporosidade (foto). Há outras regiões onde a goethita é relativamente rara, predominando a hematita lamelar. Os tamanhos são normais, com exceção de alguns porfiroblastos de HI, com até 150µm x 600µm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (30%), hematita granular (13%), hematita sinuosa (3%), martita (5%), magnetita relictas (3%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (35%), goethita terrosa (7%) e quartzo (3%).

O bandamento da rocha é medianamente nítido.

AMOSTRA: PO B PIC – IB**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra consiste de um itabirito bastante típico, com bandas bem delineadas de quartzo e hematita. O quartzo tem tamanho pouco variável (40 a 200µm), com média em 90µm. A hematita é predominantemente martítica, em grãos frequentemente subédricos, associados a Mg relictas; há tanto presença de grãos isolados de Mt, como em grupos, associada HI e pouca Hg. O tamanho de grão da Mt é normal. A gibbsita terrosa ocorre em finos veios entre os cristais de quartzo e raramente em bolsas maiores (foto). A porosidade é relativamente baixa (≈12%) e o diâmetro médio é de 150µm.

Composição de feições mineralógicas: martita (45%), hematita lamelar (20%), hematita granular (5%), magnetita relictas (3%), gibbsita (2%) e quartzo (25%).

AMOSTRA: PO B PIC <6,30 > 1,00mm**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (48%), hematita granular (20%), hematita sinuosa (3%), martita (15%), magnetita relictas (2%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (5%), goethita terrosa (3%) e quartzo (3%).

AMOSTRA: PO B PIC < 1,00mm**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (38%), hematita granular (16%), hematita sinuosa (2%), martita (15%), magnetita relictas (1%), gibbsita (5%), goethita botrioidal (8%), goethita terrosa (5%) e quartzo (10%).

AMOSTRA: LOITA PIC – CO**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra consiste de um itabirito bastante típico, com bandas bem delineadas de quartzo e hematita. O quartzo tem tamanho algo variável (40 a 180 μ m), com média em 90 μ m. A hematita apresenta-se principalmente como Hg, seguida pela Hl e com martita menos abundante, em grãos freqüentemente subédricos, associados a Mg relictos; todas as feições da hematita ocorrem em grãos isolados, como em grupos. O tamanho de grão da Hg e da Mt são normais (\approx 30 μ m), bem como a Hl (\approx 10 μ m x 30 μ m). A porosidade é relativamente baixa (\approx 12%) e o diâmetro médio dos poros é de 100 μ m.

As quantidades de quartzo e hematita variam ampla e continuamente, desde áreas quase sem hematita, até regiões onde esta é dominante.

Composição de feições mineralógicas: hematita granular (33%), hematita lamelar (20%), hematita sinuosa (2%), martita (12%), magnetita relictos (3%), gibbsita (2%), goethita botrioidal (3%) e quartzo (25%).

AMOSTRA: LOITA PIC – PO**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra é muito porosa, com cerca de 35% de porosidade. Os diâmetros dos poros variam de 2 μ m a 500 μ m (média 200 μ m). Há ocorrência significativa de poros alongados, segundo o bandamento.

As principais feições da hematita Hg, Hl e Mt mostram-se freqüentemente envoltas por Gob; também há presença significativa de fragmentos angulosos das hematitas, também envoltos por Gob. Esta mesma trama também ocorre, mas cimentada por um material terroso (muito fino), composto por Got, Hm microcristalina intempérica e poucas Gob e Gi. Há ainda presença minoritária de áreas com pouco cimento, que são bastante friáveis.

As hematitas ocorrem em suas tramas usuais. A exceção é a presença de martita, em grãos individuais (com 30 a 50 μ m de diâmetro) e conjuntos (com até 500 μ m de diâmetro e média de 200 μ m), envolvidos pelo cimento terroso.

O bandamento é nítido nesta amostra, marcado por bandas de hematita e por alinhamentos de poros.

Composição de feições mineralógicas: hematita granular (30%), hematita sinuosa (2%), hematita lamelar (15%), martita (30%), magnetita relictos (2%), gibbsita (2%), goethita botrioidal (10%), goethita terrosa (5%) e quartzo (4%).

AMOSTRA: LOITA PIC – CA**DESCRIÇÃO:**

Esta amostra é muito porosa e mostra quantidade bastante elevada de feições terrosas.

Praticamente, a única feição de hematita é a martita, que se apresenta em grãos (com média de 50 μ m de diâmetro) pseudomorfos de magnetita, isolados ou em pequenos grupos, envoltos pela Gob ou por material terroso, composto por goethita terrosa com alguma gibbsita muito fina e provavelmente pouca caulinita. O quartzo tende a ocorrer nas áreas porosas, em grãos isolados (com média de 65 μ m de diâmetro) e, mais raramente, em grupos. Há áreas mais compactas, cimentadas por Gob, mas a maioria tem trama terrosa.

Os diâmetros dos poros variam de 5µm a 700µm (média 300µm); a porosidade média é de 30%. O bandamento é pouco nítido nesta amostra, marcado por bandas de martita, nas áreas ricas em Gob.
Composição de feições mineralógicas: martita (30%), magnetita relictiva (3%), gibbsita (5%), goethita botrioidal (30%), goethita terrosa (27%) e quartzo (5%).

AMOSTRA: LOITA PIC – IB

DESCRIÇÃO:

Esta amostra é muito porosa e mostra quantidade bastante elevada de feições terrosas. Todas as feições da hematita ocorrem com tramas e tamanhos usuais. Notam-se grãos isolados e grupos de martita, envoltos por Gob e com presença de cristais maiores de Q. A gibbsita é sempre muito fina a terrosa, ocorrendo associada a Got e provavelmente caulinita.

O quartzo tende a ocorrer nas áreas porosas, em grãos isolados e, mais raramente, em grupos, com diâmetros variando de 30 a 130µm, com média em 80µm.

Os diâmetros dos poros variam de 2µm a 500µm (média 250µm); a porosidade média é de 30%; há ocorrência significativa de poros alongados.

O bandamento é bem nítido nesta amostra, marcado por bandas de HI e alinhamento de grãos de Q e de poros.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (33%), martita (27%), magnetita relictiva (3%), hematita granular (12%), hematita sinuosa (2%), quartzo (5%), goethita botrioidal (8%), goethita terrosa (6%) e gibbsita (4%).

AMOSTRA: LOITA PIC <6,3mm >1,00mm

DESCRIÇÃO:

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (28%), hematita granular (12%), hematita sinuosa (2%), martita (28%), magnetita relictiva (3%), gibbsita (3%), goethita botrioidal (10%), goethita terrosa (8%) e quartzo (6%).

AMOSTRA: LOITA PIC < 1,00mm

DESCRIÇÃO:

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (27%), hematita granular (10%), hematita sinuosa (2%), martita (26%), magnetita relictiva (3%), gibbsita (4%), goethita botrioidal (9%), goethita terrosa (7%) e quartzo (12%).

AMOSTRA: LOPIC CO

DESCRIÇÃO:

A amostra é formada predominantemente por um conjunto compacto, composto predominantemente por hematita granular, apresentando grãos de tamanho bastante fino (cerca de 30µm); alguns desses grãos são um pouco maiores, chegando a 45µm. Observam-se regiões com concentrações elevadas de hematita lamelar (25µm x 70µm), um pouco mais porosas. Relictos de magnetita (5

a 55 μm , com média de 25 μm) ocorrem associados à martita. Essas feições minoritárias mostram-se dispersas em meio à hematita granular predominante, mas também, com menos abundância, na feição lamelar. O quartzo apresenta-se em grãos relativamente pequenos (30 μm), subédricos, isolados ou em pequenos grupos, inclusos nos conjuntos de Hg. A porosidade é relativamente baixa ($\approx 10\%$); os diâmetros dos poros variam de 5 μm a 250 μm .

O bandamento é medianamente nítido e marcado pelos leitos de hematita lamelar e menos por alinhamentos de poros.

Composição de feições mineralógicas: hematita granular (50%), hematita sinuosa (5%), hematita lamelar (30%), martita (8%), magnetita relictta (3%), goethita botrioidal (2%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LOPIC CP

DESCRIÇÃO:

A amostra é composta predominantemente por hematita lamelar, geralmente com tamanho normal, isto é, relativamente pequeno (10 μm x 25 μm); contudo, há regiões onde a Hl tem lamelas maiores (20 μm x 60 μm). Há áreas com predomínio de hematita granular, em meio às regiões com domínio de Hl; em outras áreas as duas feições apresentam-se intercrescidas intimamente. A Hg também mostra usualmente tamanho normal (50 μm), mas em áreas restritas apresenta-se em porfiroblastos, com até 200 μm , onde mostra maclação freqüente.

Há heterogeneidade em relação à distribuição dos poros, pois há regiões pouco porosas ($\approx 10\%$), não muito distantes de outras mais porosas ($\approx 30\%$); o diâmetro médio dos poros fica em cerca de 250 μm , mas há alguns com até 800 μm .

O bandamento é medianamente nítido e marcado mais por alinhamentos de poros e menos pelos leitos de hematita lamelar.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (55%), hematita granular (30%), hematita sinuosa (5%), martita (5%), magnetita relictta (2%), goethita botrioidal (2%) e quartzo (1%).

AMOSTRA: LOPIC PO

DESCRIÇÃO:

A amostra é porosa e heterogênea, tanto quanto à distribuição dos poros quanto em relação às feições mineralógicas. Há cerca de 35% de porosidade. Os diâmetros dos poros variam de 2 μm a 800 μm (média 350 μm). Há ocorrência significativa de poros alongados, segundo o bandamento.

As feições mais abundantes da hematita – Hg e Hl – ocorrem em bandas enriquecidas em cada uma, mas também em áreas com misturas e intercrescimentos de ambas, mais raramente. A martita ocorre mais freqüentemente associada à Gob e feições terrosas (Got e Gi), onde também aparece o raro quartzo observado. Os tamanhos de grão de todas as feições são os normais.

O bandamento é nítido e marcado tanto por alinhamentos de poros e como pelos leitos de hematita.

Composição de feições mineralógicas: hematita granular (44%), hematita sinuosa (4%), hematita lamelar (25%), martita (12%), magnetita relictta (3%), goethita botrioidal (7%), goethita terrosa (3%), gibbsita terrosa (1%) e quartzo (1%).

AMOSTRA: LOPIC CA**DESCRIÇÃO:**

A amostra é muito porosa e com quantidade bastante elevada de feições terrosas. Praticamente, a única feição de hematita é a martita, que se apresenta em grãos (com média de 50µm de diâmetro) pseudomorfos de magnetita, isolados ou em pequenos grupos, envolvidos pela Gob ou por material terroso, composto por Got com alguma Gi muito fina e provavelmente alguma caulinita. Há áreas mais compactas, cimentadas por Gob, mas a maioria tem trama terrosa. O quartzo ocorre em grãos isolados (com média de 65µm de diâmetro); geralmente os grãos se alinham segundo a direção das bandas.

Os diâmetros dos poros variam de 5µm a 700µm (média 300µm); a porosidade média é de 30%. O bandamento é pouco nítido nesta amostra, marcado por bandas de martita e quartzo, nas áreas ricas em Gob.

Composição de feições mineralógicas: martita (50%), magnetita relictas (2%), goethita botrioidal (20%), goethita terrosa (20%), gibbsita (5%) e quartzo (3%).

AMOSTRA: LOPIC IB**DESCRIÇÃO:**

A amostra consiste de um itabirito bastante típico, com bandas bem delineadas de quartzo e hematita. O quartzo tem tamanho pouco variável (40 a 200µm), com média em 90µm. A hematita é predominantemente martítica, em grãos frequentemente subédricos, associados a Mg relictas; há tanto presença de grãos isolados de Mt, como em grupos, associada a Hl e menos a Hg. O tamanho de grão da Mt é normal. Uma trama bastante comum é de intercrescimentos de Mt com Gob e Q, em áreas de porosidade baixa a média.

A porosidade média é relativamente baixa (≈12%) e o diâmetro médio é de 150µm.

Composição de feições mineralógicas: martita (42%), hematita lamelar (27%), hematita granular (12%), magnetita relictas (2%), goethita botrioidal (5%), gibbsita (2%) e quartzo (10%).

AMOSTRA: LOPIC <6,3mm >1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (33%), hematita granular (33%), hematita sinuosa (4%), martita (14%), magnetita relictas (3%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (6%), goethita terrosa (4%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LOPIC < 1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (32%), hematita granular (32%), hematita sinuosa (4%), martita (15%), magnetita relictas (3%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (6%), goethita terrosa (4%) e quartzo (3%).

AMOSTRA: LO B PIC CO**DESCRIÇÃO:**

A amostra é formada predominantemente por um conjunto compacto, composto principalmente por hematita granular, apresentando grãos de tamanho bastante fino, com cerca de 30µm; alguns

desses grãos são um pouco maiores, chegando a 45 μ m. Observam-se regiões com concentrações elevadas de hematita lamelar (25 μ m x 70 μ m), um pouco mais porosas. Há porfiroblastos de Mt, pseudomorfos segundo a Mg; há também cristais maiores de Hg e Hl; esses grãos maiores das três feições chegam a ter dimensões de até 3 vezes as normais e são relativamente raros.

Relictos de magnetita ocorrem associados à martita, ambos inclusos nos conjuntos de Hg. A goethita maciça também ocorre da mesma forma que a Mg; em alguns pontos, notam-se grânulos de ambas (Mg e Gom) justapostos na mesma bolsa entre os cristais de Hg. Esta goethita maciça é, neste caso, produto de alteração da magnetita.

Essas feições minoritárias mostram-se dispersas em meio à hematita granular predominante, mas também, com menos abundância, na feição lamelar. O quartzo apresenta-se em grãos relativamente pequenos (30 μ m), subédricos, inclusos nos conjuntos de Hg. A porosidade é relativamente baixa (\approx 10%); os diâmetros dos poros variam de 5 μ m a 250 μ m, mas há alguns poros anômalos com até 500 μ m-750 μ m.

O bandamento é pouco nítido e marcado menos pelos leitos de hematita lamelar e mais por alinhamentos de poros.

Composição de feições mineralógicas: hematita granular (64%), hematita sinuosa (3%), hematita lamelar (20%), martita (7%), magnetita relictas (2%), goethita maciça (3%) e quartzo (1%).

AMOSTRA: LO B PIC CP

DESCRIÇÃO:

Esta amostra apresenta porosidade média de \approx 30%, com alguma heterogeneidade quanto à distribuição dos poros; seu diâmetro médio fica em cerca de 250 μ m, mas há alguns com até 800 μ m.

As três feições da hematita – Hl, Hg e Mt – mostram abundância semelhante, com a Mt um pouco mais rara. A distribuição destas feições também mostra pouca heterogeneidade, com áreas escassas com segregações. As dimensões das feições são normais, mas há ocorrência de porfiroblastos de Mt, pseudomorfos segundo Mg, e também de Hl; esses grãos maiores das feições chegam a ter dimensões de até 3 vezes as normais e são medianamente raros.

O bandamento é medianamente nítido e marcado mais por alinhamentos de poros.

Composição de feições mineralógicas: hematita granular (35%), hematita sinuosa (2%), hematita lamelar (35%), martita (22%), magnetita relictas (2%), goethita botrioidal (2%), gibbsita (1%) e quartzo (1%).

AMOSTRA: LO B PIC PO

DESCRIÇÃO:

A amostra é porosa e heterogênea, tanto quanto à distribuição dos poros quanto em relação às feições mineralógicas. Há cerca de 35% de porosidade. Os diâmetros dos poros variam de 2 μ m a 1200 μ m (média 350 μ m). Há ocorrência significativa de poros alongados, segundo o bandamento, que é relativamente nítido na amostra.

Ocorrem dois tipos de trama nesta amostra, ambas com abundância similar. A primeira compõe-se de Hg e Mt intercrescidas, contendo quantidade apreciável (\approx 10%) de Mg relictas, com pouca Hl. Há presença rara de grãos anédricos de quartzo, em grupos, nas áreas mais porosas. Todas essas feições têm dimensões normais.

O segundo tipo de trama é constituído principalmente por Hl, com incidência minoritária de Hg e Mt. Notável é que a Hl ocorre em grupos coesos, embora porosos, mas também como cristalitos desarticulados. Os cristalitos desta hematita lamelar fina desarticulada acham-se distribuídos com alguma orientação e são ligados por um cimento composto de goethita terrosa e gibbsita; esta ocorre em grãos equiaxiais subédricos e também como massa terrosa, intercrescida com a Got. Os grupos coesos de Hl e as áreas de cristalitos desarticulados mostram-se distribuídos irregularmente e têm abundância aproximadamente igual.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (40%), hematita granular (24%), hematita sinuosa (1%), martita (20%), magnetita relictas (4%), goethita botrioidal (1%), goethita terrosa (3%), gibbsita (5%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LO B PIC CA

DESCRIÇÃO:

As partículas analisadas são constituídas predominantemente de goethita botrioidal mais goethita terrosa. A trama é a típica coliforme, com intercrescimentos complexos e heterogêneos de Gob e Got, com alto grau de porosidade. Alguma hematita secundária, pseudomorfa de Gob também é observada, geralmente nas camadas periféricas de estruturas coliformes. A gibbsita também ocorre principalmente como grãos subédricos, em grupos, preenchendo poros e fissuras; também há presença de Gi terrosa, associada à Got. Raros cristais de Hl e de quartzo também estão presentes, imersos nas massas de Gob e Got.

O bandamento é pouco nítido.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (5%), goethita botrioidal (50%), goethita terrosa (33%), gibbsita (10%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LO B PIC <6,3mm > 1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (34%), hematita granular (37%), hematita sinuosa (2%), martita (14%), magnetita relictas (3%), gibbsita (2%), goethita botrioidal (4%), goethita terrosa (2%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LO B PIC < 1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (30%), hematita granular (34%), hematita sinuosa (2%), martita (14%), magnetita relictas (3%), gibbsita (4%), goethita botrioidal (6%), goethita terrosa (4%) e quartzo (3%).

AMOSTRA: LO CMT <6,3mm > 1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (24%), hematita granular (40%), hematita sinuosa (16%), hematita microcristalina (2%), martita (8%), magnetita relictas (2%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (3%), goethita terrosa (2%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LO CMT <1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (25%), hematita granular (38%), hematita sinuosa (15%), hematita microcristalina (2%), martita (8%), magnetita relictas (3%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (3%), goethita terrosa (3%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LO ABO <6,3mm >1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (4%), hematita granular (73%), hematita sinuosa (2%), martita (6%), magnetita relictas (1%), gibbsita (2%), goethita botrioidal (8%), goethita terrosa (3%) e quartzo (1%).

AMOSTRA: LO ABO <1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (4%), hematita granular (70%), hematita sinuosa (2%), martita (6%), magnetita relictas (1%), gibbsita (2%), goethita botrioidal (10%), goethita terrosa (3%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LO TAM <6,3mm >1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (15%), hematita granular (52%), hematita sinuosa (5%), hematita microcristalina (4%), martita (7%), magnetita relictas (2%), gibbsita (2%), goethita botrioidal (7%), goethita terrosa (4%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LO TAM <1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (15%), hematita granular (45%), hematita sinuosa (4%), hematita microcristalina (4%), martita (8%), magnetita relictas (3%), gibbsita (3%), goethita botrioidal (10%), goethita terrosa (5%) e quartzo (3%).

AMOSTRA: LO JGD <6,3mm >1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (4%), hematita granular (48%), hematita sinuosa (8%), martita (28%), magnetita relictas (6%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (3%), goethita terrosa (1%) e quartzo (1%).

AMOSTRA: LO JGD <1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (4%), hematita granular (45%), hematita sinuosa (7%), martita (28%), magnetita relictas (6%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (5%), goethita terrosa (2%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: PO A PIC <6,3mm >1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.

Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (20%), hematita granular (45%), hematita sinuosa (4%), martita (12%), magnetita relictas (7%), gibbsita (1%), goethita botrioidal (5%), goethita terrosa (2%) e quartzo (4%).

AMOSTRA: PO A PIC <1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.
Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (14%), hematita granular (45%), hematita sinuosa (4%), martita (14%), magnetita relictas (7%), gibbsita (2%), goethita botrioidal (4%), goethita terrosa (2%) e quartzo (8%).

AMOSTRA: LO VGR <6,3mm >1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração entre 6,30 e 1,00mm.
Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (27%), hematita granular (50%), hematita sinuosa (2%), martita (10%), magnetita relictas (3%), gibbsita (2%), goethita botrioidal (3%), goethita terrosa (1%) e quartzo (2%).

AMOSTRA: LO VGR <1,00mm

Esta amostra apresenta partículas na fração menor que 1,00mm.
Composição de feições mineralógicas: hematita lamelar (26%), hematita granular (46%), hematita sinuosa (2%), martita (10%), magnetita relictas (3%), gibbsita (4%), goethita botrioidal (5%), goethita terrosa (2%) e quartzo (2%).

Anexo 5

Tabelas de distribuição mineralógica das tipologias dos produtos granulados de minério de ferro.

Tipologias das amostras de granulados	Assembléias mineralógicas (%) e avaliação quantitativa da porosidade, com utilização da microscopia ótica													
	% Tipolog.	Hematita granular (Hg)	Hematita sinuosa (Hs)	Martita (Mt)	Magnetita (Mg)	Hematita lamelar (Hl)	Hematita microcristalina (Hc)	Jacobsita (Mn e Fe) (Jc)	Goethita (Go)	Gibbsita (Gb)	Quartzo (Qz)	Carbonato (Cr)	Agregados Terrosos (At)	Porosidade relativa (Pr)
LO JGD - CO	68,60	73,00	0,00	23,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO CMT - CO	43,17	85,00	12,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1
LO TAM - CO	24,30	88,00	2,00	1,50	0,50	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1
LO VGR - CO	75,40	65,00	0,00	7,00	3,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO ABO - CO	39,40	94,00	2,00	0,00	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1
LO PIC - CO	38,70	50,00	5,00	8,00	3,00	30,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00	1
LO CPX - CO	15,80	8,00	4,00	8,00	0,00	40,00	40,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1
PO A PIC - CO	57,90	62,00	10,00	10,00	10,00	0,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2
PO B PIC - CO	32,20	5,00	0,00	16,00	3,00	55,00	0,00	0,00	1,00	0,00	20,00	0,00	0,00	1
LO B PIC - CO	23,00	64,00	3,00	7,00	2,00	20,00	0,00	0,00	3,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1
LO ITA PIC - CO	9,40	33,00	2,00	12,00	3,00	20,00	0,00	0,00	3,00	2,00	25,00	0,00	0,00	1
% minerais e porosidade:CO	38,90	63,14	3,67	9,22	2,99	15,51	1,48	0,00	1,57	0,04	2,38	0,00	0,00	1,81
LO JGD - CP	16,60	30,00	26,00	30,00	10,00	3,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO CMT - CP	31,60	29,00	48,00	2,00	5,00	12,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00	3
LO TAM - CP	52,50	72,00	2,00	8,00	0,00	16,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2
LO VGR - CP	13,00	50,00	5,00	7,00	3,00	35,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO ABO - CP	32,00	88,00	0,00	8,00	1,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2
LO PIC - CP	38,50	30,00	5,00	5,00	2,00	55,00	0,00	0,00	2,00	0,00	1,00	0,00	0,00	2
LO CPX - CP	47,10	42,00	0,00	0,00	0,00	5,00	40,00	10,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
PO A PIC - CP	14,20	50,00	7,00	5,00	5,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	2
PO B PIC - CP	25,00	21,00	3,00	10,00	3,00	59,00	0,00	0,00	1,00	1,00	2,00	0,00	0,00	3
LO B PIC - CP	48,70	35,00	2,00	22,00	2,00	35,00	0,00	0,00	2,00	1,00	1,00	0,00	0,00	3
% minerais e porosidade:CP	29,02	46,16	8,09	9,13	2,24	24,15	5,90	1,48	1,32	0,23	0,98	0,00	0,33	2,57

Anexo 5

Tipologias das amostras de granulados	Assembléias mineralógicas (%) e avaliação quantitativa da porosidade, com utilização da microscopia ótica													
	% Tipolog.	Hematita granular (Hg)	Hematita sinuosa (Hs)	Martita (Mt)	Magnetita (Mg)	Hematita lamelar (Hl)	Hematita microcristalina (Hc)	Jacobsita (Mn e Fe) (Jc)	Goethita (Go)	Gibbsita (Gb)	Quartzo (Qz)	Carbonato (Cr)	Agregados Terrosos (At)	Porosidade relativa (Pr)
LO JGD - PO	9,60	23,00	20,00	40,00	17,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO CMT - PO	10,77	70,00	19,00	5,00	2,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO TAM - PO	11,20	30,00	27,00	12,00	3,00	27,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO VGR - PO	5,00	17,00	0,00	30,00	5,00	44,00	0,00	0,00	1,00	3,00	0,00	0,00	0,00	3
LO ABO - PO	7,30	63,00	3,00	12,00	1,00	13,00	0,00	0,00	7,00	0,00	1,00	0,00	0,00	3
LO PIC - PO	5,40	44,00	4,00	12,00	3,00	25,00	0,00	0,00	10,00	1,00	1,00	0,00	0,00	3
LO CPX - PO	18,50	24,00	4,00	30,00	0,00	35,00	0,00	0,00	3,00	4,00	0,00	0,00	0,00	3
PO A PIC - PO	15,10	28,00	5,00	7,00	2,00	54,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	2
PO B PIC - PO	16,70	45,00	3,00	5,00	3,00	40,00	0,00	0,00	1,00	1,00	2,00	0,00	0,00	3
LO B PIC - PO	8,60	24,00	1,00	20,00	4,00	40,00	0,00	0,00	4,00	5,00	2,00	0,00	0,00	3
LO ITA PIC - PO	4,50	30,00	2,00	30,00	2,00	15,00	0,00	0,00	15,00	2,00	4,00	0,00	0,00	3
% minerais e porosidade:PO	10,24	35,97	8,52	17,09	3,47	29,62	0,00	0,00	2,62	1,45	1,26	0,00	0,00	2,87
LO JGD - CA	5,60	13,00	8,00	66,00	2,00	6,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	1,00	0,00	3
LO CMT - CA	15,00	5,00	63,00	7,00	3,00	2,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO TAM - CA	12,00	8,00	0,00	3,00	3,00	12,00	0,00	0,00	74,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3
LO VGR - CA	6,50	20,00	0,00	27,00	0,00	35,00	0,00	0,00	15,00	3,00	0,00	0,00	0,00	3
LO ABO - CA	21,30	46,00	3,00	0,00	1,00	5,00	0,00	0,00	44,00	0,00	1,00	0,00	0,00	3
LO PIC - CA	17,30	0,00	0,00	50,00	2,00	0,00	0,00	0,00	40,00	5,00	3,00	0,00	0,00	3
LO CPX - CA	2,70	12,00	2,00	3,00	0,00	25,00	0,00	0,00	55,00	2,00	1,00	0,00	0,00	3
PO A PIC - CA	6,70	25,00	1,00	2,00	1,00	5,00	0,00	0,00	65,00	0,00	1,00	0,00	0,00	3
PO B PIC - CA	12,50	13,00	3,00	5,00	3,00	30,00	0,00	0,00	42,00	1,00	3,00	0,00	0,00	3
LO B PIC - CA	19,70	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	83,00	10,00	2,00	0,00	0,00	3
LO ITA PIC - CA	16,60	0,00	0,00	30,00	3,00	0,00	0,00	0,00	57,00	5,00	5,00	0,00	0,00	3
% minerais e porosidade:CA	12,35	12,63	8,12	15,70	1,78	8,21	0,00	0,00	48,81	2,97	1,78	0,04	0,00	3,00
LO PIC - IB	0,10	12,00	0,00	42,00	2,00	27,00	0,00	0,00	5,00	2,00	10,00	0,00	0,00	1
PO A PIC - IB	6,10	0,00	0,00	33,00	5,00	5,00	0,00	0,00	9,00	0,00	48,00	0,00	0,00	1
PO B PIC - IB	13,60	5,00	0,00	45,00	3,00	20,00	0,00	0,00	0,00	2,00	25,00	0,00	0,00	1
LO ITA PIC - IB	69,50	12,00	2,00	27,00	3,00	33,00	0,00	0,00	14,00	4,00	5,00	0,00	0,00	3
% minerais e porosidade:IB	22,33	10,11	1,56	30,17	3,14	29,10	0,00	0,00	11,52	3,42	10,99	0,00	0,00	2,56
LO CPX - PM (proto-minério)	15,90	20,00	3,00	0,00	0,00	50,00	10,00	0,00	4,00	12,00	1,00	0,00	0,00	3

Nomenclatura das tipologias: CO - compacta; CP - compacta porosa; PO - porosa; CA - canga; IB - itabirito; PM - proto minério.

Porosidade relativa com base na avaliação por microscopia ótica: 1 - Baixa (< 10%); 2 - Média (10 a 20%); 3 - Alta (> 20%)

Anexo 5

Amostras	Mineralogia e porosidade: médias ponderadas pelos percentuais granulométricos											Pr média	
	Hg	Hs	Mt	Mg	HI	Hc	Jc	Go	Gb	Qz	Cr		At
LOJGD	57,99	6,68	28,29	4,78	2,21	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,06	0,00	3,01
LOCMT	54,15	31,84	2,22	2,25	5,82	0,00	0,00	3,63	0,00	0,63	0,00	0,00	2,15
LO TAM	63,50	4,56	6,27	0,82	14,81	0,00	0,00	8,99	0,00	0,00	0,00	1,05	1,99
LO VGR	57,66	0,65	9,44	2,90	27,88	0,00	0,00	1,03	0,35	0,00	0,00	0,00	3,00
LO ABO	79,59	1,65	3,44	1,00	3,76	0,00	0,00	9,88	0,00	0,68	0,00	0,00	1,89
LO PIC	33,29	4,08	14,36	2,44	34,16	0,00	0,00	9,01	0,92	1,74	0,00	0,00	1,84
LO CPX	28,99	1,90	6,90	0,00	23,78	26,75	4,71	4,09	2,70	0,19	0,00	0,00	2,68
PO A PIC	48,90	7,61	9,70	7,17	12,34	0,00	0,00	9,54	0,00	4,74	0,00	0,00	2,01
PO B PIC	16,68	1,63	15,23	3,00	45,61	0,00	0,00	5,99	0,81	11,05	0,00	0,00	2,08
LO B PIC	33,83	1,75	14,04	1,78	26,07	0,00	0,00	18,36	2,89	1,28	0,00	0,00	2,54
LO ITA PIC	12,79	1,67	26,22	2,96	25,49	0,00	0,00	20,15	3,89	6,84	0,00	0,00	2,81

Anexo 6

Tabelas do tamanho dos minerais, associados às tipologias dos produtos granulados, com base na microscopia ótica.

Tipologias das amostras de granulados	Tamanho médio dos minerais e poros (μm)												
	Hematita granular (Hg)	Hematita sinuosa (Hs)	Martita (Mt)	Magnetita (Mg)	Hematita lamelar (Hl)	Hematita microcristalina (Hc)	Jacobsita (Mn e Fe) (Jc)	Goethita (Go)	Gibbsita (Gb)	Quartzo (Qz)	Carbonato (Cr)	Agregados Terrosos (At)	Tamanho médio Poros (Tpo)
LO JGD - CO	20,00		25,00	15,00	30,00								65,00
LO CMT - CO	35,00	35,00			30,00								50,00
LO TAM - CO	10,00	9,00	15,00	10,00	15,00								55,00
LO VGR - CO	30,00		10,00	5,00	10,00								60,00
LO ABO - CO	15,00	13,00		18,00	11,00					10,00			75,00
LO PIC - CO	40,00	35,00	40,00	30,00	50,00			30,00		30,00			125,00
LO CPX - CO	40,00	37,50	175,00		37,50	6,25							22,50
PO A PIC - CO	25,00	15,00	20,00	15,00				7,00					45,00
PO B PIC - CO	35,00		25,00	20,00	30,00			30,00		30,00			100,00
LO B PIC - CO	30,00	25,00	60,00	25,00	50,00			35,00		30,00			130,00
LO ITA PIC - CO	30,00	20,00	30,00	25,00	30,00			25,00	20,00	90,00			100,00
Tamanhos médios em μm	28,18	23,69	44,44	18,11	29,35	6,25	0,00	25,40	20,00	38,00	0,00	0,00	75,23
LO JGD - CP	18,00	20,00	30,00	20,00	5,00			12,00					75,00
LO CMT - CP	26,00	25,00	28,00	15,00	12,00			18,00		12,00			60,00
LO TAM - CP	30,00	25,00	20,00		45,00							5,00	60,00
LO VGR - CP	30,00	25,00	20,00	10,00	25,00								65,00
LO ABO - CP	30,00		20,00	15,00	120,00								85,00
LO PIC - CP	80,00	40,00	35,00	20,00	30,00			25,00		35,00			250,00
LO CPX - CP	35,00				40,00	6,25	62,00	45,00					100,00
PO A PIC - CP	20,00	15,00	25,00	15,00	30,00					10,00			90,00
PO B PIC - CP	30,00	25,00	20,00	20,00	35,00			15,00	12,00	60,00			250,00
LO B PIC - CP	35,00	25,00	50,00	25,00	40,00			25,00	15,00	30,00			250,00
Tamanhos médios em μm	33,40	22,22	24,80	15,56	34,73	6,25	62,00	23,33	13,50	29,40	0,00	5,00	116,82

Anexo 6

Tipologias das amostras de granulados	Tamanho médio dos minerais e poros (μm)												
	Hematita granular (Hg)	Hematita sinuosa (Hs)	Martita (Mt)	Magnetita (Mg)	Hematita lamelar (Hl)	Hematita microcristalina (Hc)	Jacobsita (Mn e Fe) (Jc)	Goethita (Go)	Gibbsita (Gb)	Quartzo (Qz)	Carbonato (Cr)	Agregados Terrosos (At)	Tamanho médio Poros (Tpo)
LO JGD - PO	10,00	12,00	30,00	20,00									150,00
LO CMT - PO	35,00	10,00	30,00	32,00	12,00								80,00
LO TAM - PO	20,00	16,00	25,00	20,00	35,00			15,00					75,00
LO VGR - PO	25,00		30,00	20,00	35,00			12,00	100,00				80,00
LO ABO - PO	18,00	13,00	15,00	10,00	12,00			10,00		12,00			110,00
LO PIC - PO	40,00	35,00	30,00	20,00	45,00			15,00	13,00	30,00			350,00
LO CPX - PO	45,00	40,00	85,00		30,00			35,00	40,00				185,00
PO A PIC - PO	15,00	12,00	20,00	15,00	30,00					10,00			130,00
PO B PIC - PO	30,00	25,00	25,00	15,00	35,00			20,00	30,00	35,00			85,00
LO B PIC - PO	35,00	30,00	40,00	20,00	35,00			20,00	35,00	30,00			350,00
LO ITA PIC - PO	35,00	20,00	20,00	25,00	30,00			35,00	20,00	40,00			200,00
Tamanhos médios em μm	28,00	21,30	31,82	19,70	29,90	0,00	0,00	20,25	39,67	26,17	0,00	0,00	163,18
LO JGD - CA	20,00	20,00	30,00	15,00	35,00			15,00			30,00		130,00
LO CMT - CA	30,00	20,00	30,00	15,00	20,00			25,00					85,00
LO TAM - CA	25,00		30,00	15,00	30,00			10,00					80,00
LO VGR - CA	25,00		30,00		25,00			20,00	120,00				85,00
LO ABO - CA	32,00	25,00		15,00	18,00			20,00		12,00			120,00
LO PIC - CA			50,00	35,00				30,00	45,00	65,00			300,00
LO CPX - CA	40,00	35,00	65,00		35,00			45,00	40,00	20,00			150,00
PO A PIC - CA	15,00	12,00	20,00	15,00	25,00			15,00		10,00			140,00
PO B PIC - CA	30,00	25,00	25,00	20,00	100,00			45,00	35,00	40,00			350,00
LO B PIC - CA					30,00			5,00	40,00	35,00			400,00
LO ITA PIC - CA			50,00	25,00				35,00	30,00	65,00			300,00
Tamanhos médios em μm	27,13	22,83	36,67	19,38	35,33	0,00	0,00	24,09	51,67	35,29	2,73	0,00	194,55
LO PIC - IB	45,00		40,00	20,00	35,00			25,00	20,00	90,00			150,00
PO A PIC - IB			55,00	30,00	25,00			15,00		60,00			140,00
PO B PIC - IB	30,00		35,00	25,00	35,00				35,00	90,00			150,00
LO ITA PIC - IB	35,00	25,00	40,00	20,00	30,00			30,00	20,00	80,00			250,00
Tamanhos médios em μm	36,67	25,00	42,50	23,75	31,25	0,00	0,00	23,33	25,00	80,00	0,00	0,00	172,50
LO CPX - PM (proto-minério)	45,00	40,00			40,00	6,25		45,00	70,00	700,00			200,00

Nomenclatura das tipologias: CO - compacta; CP - compacta porosa; PO - porosa; CA - canga; IB - itabirito; PM - proto minério.

Anexo 7

Tabelas de distribuição mineralógica das frações finas (<6,30 >1,00 mm e <1,00 mm) das amostras geradas nos ensaios metalúrgicos de tamboramento.

Mineralogia dos finos gerados nos testes de tamboramento: frações <6,30 >1,00 mm e < que 1,00 mm	Assembléias mineralógicas (%)											
	% Frações	Hematita granular (Hg)	Hematita sinuosa (Hs)	Martita (Mt)	Magnetita (Mg)	Hematita lamelar (Hl)	Hematita Microcristalina (Hc)	Jacobsita (Mn e Fe) (Jc)	Criptomelana/Pirolusita (Cp)	Goethita (Go)	Gibbsita (Gb)	Quartzo (Qz)
LO JGD <6,3 >1,00 mm	77,88	48,00	8,00	28,00	6,00	4,00	0,00	0,00	0,00	4,00	1,00	1,00
LO CMT <6,3 >1,00 mm	62,33	40,00	16,00	8,00	2,00	24,00	2,00	0,00	0,00	5,00	1,00	2,00
LO TAM <6,3 >1,00 mm	64,84	52,00	5,00	7,00	2,00	15,00	4,00	0,00	0,00	11,00	2,00	2,00
LO VGR <6,3 >1,00 mm	71,93	50,00	2,00	10,00	3,00	27,00	0,00	0,00	0,00	4,00	2,00	2,00
LO ABO <6,3 >1,00 mm	64,50	73,00	2,00	6,00	1,00	4,00	0,00	0,00	0,00	11,00	2,00	1,00
LO PIC <6,3 >1,00 mm	54,46	33,00	4,00	14,00	3,00	33,00	0,00	0,00	0,00	10,00	1,00	2,00
LO CPX <6,3 >1,00 mm	65,40	22,00	2,00	0,00	0,00	40,00	20,00	2,00	1,00	6,00	6,00	1,00
PO A PIC <6,3 >1,00 mm	71,78	45,00	4,00	12,00	7,00	20,00	0,00	0,00	0,00	7,00	1,00	4,00
PO B PIC <6,3 >1,00 mm	61,08	20,00	3,00	15,00	2,00	48,00	0,00	0,00	0,00	8,00	1,00	3,00
LO B PIC <6,3 >1,00 mm	62,25	37,00	2,00	14,00	3,00	34,00	0,00	0,00	0,00	6,00	2,00	2,00
LO ITA PIC <6,3 >1,00 mm	73,30	28,00	2,00	28,00	3,00	12,00	0,00	0,00	0,00	18,00	3,00	6,00
% médio dos minerais	66,34	41,04	4,53	13,30	3,01	22,96	2,32	0,18	0,09	8,16	2,01	2,40
LO JGD <1,00 mm	22,12	45,00	7,00	28,00	6,00	4,00	0,00	0,00	0,00	7,00	1,00	2,00
LO CMT <1,00 mm	37,67	38,00	15,00	8,00	3,00	25,00	2,00	0,00	0,00	6,00	1,00	2,00
LO TAM <1,00 mm	35,16	45,00	4,00	8,00	3,00	15,00	4,00	0,00	0,00	15,00	3,00	3,00
LO VGR <1,00 mm	28,07	46,00	2,00	10,00	3,00	26,00	0,00	0,00	0,00	7,00	4,00	2,00
LO ABO <1,00 mm	35,50	70,00	2,00	6,00	1,00	4,00	0,00	0,00	0,00	13,00	2,00	2,00
LO PIC <1,00 mm	45,54	32,00	4,00	15,00	3,00	32,00	0,00	0,00	0,00	10,00	1,00	3,00
LO CPX <1,00 mm	34,60	22,00	2,00	0,00	0,00	38,00	18,00	3,00	2,00	7,00	7,00	1,00
PO A PIC <1,00 mm	28,22	45,00	4,00	14,00	7,00	14,00	0,00	0,00	0,00	6,00	2,00	8,00
PO B PIC <1,00 mm	38,92	16,00	2,00	15,00	1,00	38,00	0,00	0,00	0,00	13,00	5,00	10,00
LO B PIC <1,00 mm	37,75	34,00	2,00	14,00	3,00	30,00	0,00	0,00	0,00	10,00	4,00	3,00
LO ITA PIC <1,00 mm	26,70	10,00	2,00	26,00	3,00	27,00	0,00	0,00	0,00	16,00	4,00	12,00
% médio dos minerais	33,66	36,32	4,21	12,37	2,80	24,12	2,27	0,28	0,19	10,11	3,09	4,25