

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

Tese de Doutorado

**“Caracterização mineralógica dos minérios de magnesita
do conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba
(Serra das Éguas, Brumado, BA)”**

Autor: Luís Rodrigues Armôa Garcia
Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Fevereiro/2004

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

Luís Rodrigues Armôa Garcia

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS MINÉRIOS DE MAGNESITA
DO CONJUNTO MINEIRO PEDRA PRETA-JATOBÁ-POMBA
(SERRA DAS ÉGUAS, BRUMADO, BA)**

**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. Paulo Roberto Gomes Brandão**

**Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2004**

*À minha esposa Fátima,
a meus filhos Cristiano, André, Izabel e Fernando,
a meus irmãos Edson (in memoriam) e Geraldo
e a meus pais Antônio e Tota pelos seus 60 anos de casados.*

Agradecimentos

Ao Prof. José Marques Correia Neves por seu constante estímulo, ao Prof. Kazuo Fuzikawa pela sua ajuda e visão crítica, e a orientação segura e tranqüila do Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão.

À Magnesita S. A., nas pessoas dos engenheiros Luiz Rodolfo Mariani Bittencourt, Amílcar Guimarães e Paulo Roberto Secco pelo acesso às informações, amostras e recursos laboratoriais.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), na pessoa do químico Roberto Pellacani Guedes Monteiro, chefe do Serviço de Química e Mineralogia.

À ajuda de muitos e queridos amigos, que pegaram na massa, dentre os quais destacamos: Willian Tito Soares e Ney Sampaio do LMA; Humberto Terrazas Salas, João Batista Santos Barbosa, Fernando Lameiras, Jésus Carneiro, Aurélio e Francisco Javier Rios do CDTN; Arlindo Nonato, Helton, Danilo, Amorim, Irénquer e Auxiladora do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Magnesita (CPqD) e o Prof. Newton Gomes da UFOP.

Finalmente aos anônimos e pacientes ouvidos que tomamos emprestados para nos escutar enquanto tentávamos juntar os pedaços de nossa colcha de retalhos.

Os trabalhos de microanálise e microscopia eletrônica de varredura foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálises (LMA) do Consórcio Física, Geologia, Química-UFMG/ CDTN/CNEN, financiado com verba da FAPEMIG (projeto CEX 1074/95). Agradecemos ao coordenador do consórcio, Prof. Abá Israel Cohen Persiano.

Sumário

| | |
|--|-------------|
| AGRADECIMENTOS | I |
| SUMÁRIO | II |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | VI |
| LISTA DE TABELAS..... | X |
| LISTA DE TABELAS..... | X |
| LISTA DE ABREVIATURAS | XII |
| LISTA DE MINERAIS REFERIDOS NO TEXTO..... | XIII |
| RESUMO..... | XV |
| ABSTRACT..... | XVI |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO..... | 2 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 3.1 – ASPECTOS MINERALÓGICOS | 3 |
| 3.2 – TIPOS DE DEPÓSITO DE MAGNESITA | 4 |
| 3.2.1 – Tipo Veitsch - (Depósitos de magnesita macrocristalina)..... | 5 |
| 3.2.2 – Tipo Kraubath (Depósitos de magnesita microcristalina)..... | 6 |
| 3.2.3 – Tipo Greiner | 6 |
| 3.2.4 – Tipo Bela Stena..... | 7 |
| 3.3 – PRODUTORES E RESERVAS | 10 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4 – UTILIZAÇÃO DA MAGNESITA..... | 16 |
| 3.5 – A MAGNESITA DA SERRA DAS ÉGUAS..... | 18 |
| 3.5.1 – Histórico | 18 |
| 3.5.2 – Localização | 20 |
| 3.5.3 – Aspectos da Geologia Regional..... | 23 |
| 3.5.4 – A gênese da magnesita | 24 |
| 3.5.5 – As minas | 27 |
| 3.5.6 – O conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba..... | 30 |
| 3.5.7 – A lavra e o processamento do minério | 32 |
| 3.5.8 – O fenômeno da decrepitação | 35 |
| 3.6 – TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO | 37 |
| 3.6.1 – Microscopia óptica (MO) | 38 |
| 3.6.2 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)..... | 39 |
| 3.6.3 – Catodoluminescência (CL) | 40 |
| 3.6.4 – Inclusões fluidas..... | 41 |
| 3.6.5 – Microanálise eletrônica | 42 |
| 3.6.6 – Difractometria de raios-X (DRX)..... | 43 |
| 3.6.7 – Análises Térmicas | 45 |
| 3.6.8 – Preparação de amostras | 46 |
| 3.7 – CALCINAÇÃO E SINTERIZAÇÃO..... | 47 |
| 4. METODOLOGIA..... | 51 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1 – SISTEMÁTICA..... | 51 |
| 4.2 – EQUIPAMENTO UTILIZADO..... | 53 |
| 5. RESULTADOS..... | 55 |
| 5.1 – ANÁLISES QUÍMICAS..... | 55 |
| 5.2 – DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X..... | 57 |
| 5.3 – MICROSCOPIA ÓPTICA..... | 59 |
| 5.3.1 – Amostra TJ..... | 62 |
| 5.3.2 – Amostra TP..... | 64 |
| 5.3.3 - Amostra TPP..... | 66 |
| 5.3.4 – Amostra PP-704..... | 68 |
| 5.3.5 – Amostra PP-RGF..... | 70 |
| 5.3.6 – Amostra PP-BGF..... | 72 |
| 5.4 – INCLUSÕES FLUIDAS..... | 74 |
| 5.5 – ANÁLISES TÉRMICAS..... | 80 |
| 5.6 – ESTUDO EM CATODOLUMINESCÊNCIA..... | 82 |
| 5.7 – ESTUDOS MICROANALÍTICOS..... | 86 |
| 5.7.1 – Análises de hematitas..... | 86 |
| 5.7.2 – Análises de cloritas..... | 87 |
| 5.7.3 – Análises de talco..... | 88 |
| 5.7.4 – Análises de dolomita..... | 89 |
| 5.7.5 – Minerais acessórios..... | 90 |

| | |
|--|------------|
| 5.7.6 – Análises das magnesitas | 92 |
| 5.8 – TESTES DE QUEIMA..... | 97 |
| 5.8.1 – Primeiro ciclo de testes de queima..... | 97 |
| 5.8.2 – Segundo ciclo de testes de queima..... | 101 |
| 5.9 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 113 |
| 5.9.1 – Microscopia Óptica | 113 |
| 5.9.2 – Catodoluminescência | 113 |
| 5.9.3 – Inclusões fluidas..... | 114 |
| 5.9.4 – Microanálise | 114 |
| 5.9.5 – Difratometria de raios-X | 116 |
| 5.9.6 – Termoanálises | 116 |
| 5.9.7 – Testes de queima..... | 116 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 118 |
| 7. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO..... | 121 |
| 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 122 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 123 |
| DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR | 135 |
| ANEXO A..... | 136 |
| ANEXO B | 149 |
| ANEXO C..... | 151 |

Lista de Ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 3-1 – Estrutura da magnesita..... | 4 |
| Figura 3-2 – Localização de depósitos de magnesita no mundo. | 14 |
| Figura 3-3 – Mapa de localização da área de Brumado. | 22 |
| Figura 3-4 – Coluna estratigráfica simplificada do grupo Serra das Éguas. | 24 |
| Figura 3-5 – Esboço geológico com localização do conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba. | 28 |
| Figura 3-6 – Legenda para a Figura 3-5 e corte geológico esquemático..... | 29 |
| Figura 3-7 – Corte geológico esquemático da mina de Pedra Preta. | 30 |
| Figura 3-8 – Fluxograma da produção do minério para o sínter M-10. | 32 |
| Figura 3-9 – Fluxograma da produção do minério para o sínter M-20. | 33 |
| Figura 3-10 – Fluxograma da produção do minério para o sínter M-30. | 34 |
| Figura 3-11 – A nucleação dos cristalitos de MgO na queima da magnesita..... | 48 |
| Figura 5-1 – Difratoograma para a amostra TJ-A..... | 57 |
| Figura 5-2 – Aspecto macroscópico da amostra TJ | 62 |
| Figura 5-3 – Aspecto microscópico da amostra TJ. Nicóis cruzados. | 62 |
| Figura 5-4 – Aspecto macroscópico da amostra TP..... | 64 |
| Figura 5-5 – Aspecto microscópico da amostra TP. Nicóis cruzados..... | 64 |
| Figura 5-6 – Aspecto macroscópico da amostra TPP | 66 |
| Figura 5-7 – Aspecto microscópico da amostra TPP. Nicóis cruzados..... | 66 |
| Figura 5-8 – Aspecto macroscópico da amostra PP-704..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 5-9 – Aspecto microscópico da amostra PP-704. Nicóis cruzados..... | 68 |
| Figura 5-10 – Aspecto macroscópico da amostra PP-RGF | 70 |
| Figura 5-11 – Aspecto microscópico da amostra PP-RGF. Nicóis cruzados. | 70 |
| Figura 5-12 – Aspecto macroscópico da amostra PP-BGF | 72 |
| Figura 5-13 – Aspecto microscópico da amostra PP-BGF. Nicóis cruzados. | 72 |
| Figura 5-14 – Fotomicrografia de inclusões fluidas na amostra TPP-B (Mina Pedra Preta)..... | 75 |
| Figura 5-15 – Fotomicrografia de inclusões fluidas na amostra TJ-C (Mina Jatobá) | 75 |
| Figura 5-16 – Fotomicrografia de inclusões fluidas na amostra TP-B (Mina Pomba)..... | 76 |
| Figura 5-17 - Inclusões fluidas trifásicas (Líquido + sólido + gás) na amostra TPP-B. | 77 |
| Figura 5-18 - Ampliação da Figura 5-17 para mostrar detalhes de uma inclusão. | 77 |
| Figura 5-19 - Diagrama de fases para o CO ₂ | 78 |
| Figura 5-20 - Efeito do sal no solvus do sistema CO ₂ -H ₂ O | 79 |
| Figura 5-21 - Diagrama P-T para o sistema CO ₂ na faixa de altas temperaturas. | 79 |
| Figura 5-22 – Termograma TG e DTG para a amostra PP704-A..... | 81 |
| Figura 5-23 – Lâminas delgadas vistas em catodoluminescência..... | 83 |
| Figura 5-24 – Variação na distribuição de ferro e de manganês em um campo da amostra TPP-A. | 85 |
| Figura 5-25 – Espectro de energia de hematita..... | 86 |
| Figura 5-26 – Espectro de energia de clorita | 87 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5-27 – Espectro de energia do talco | 88 |
| Figura 5-28 – Espectro de energia de dolomita | 89 |
| Figura 5-29 – Espectro de energia de apatita rica em cloro | 91 |
| Figura 5-30 – Espectro de energia da monazita..... | 91 |
| Figura 5-31 – Espectro de energia do rutilo | 91 |
| Figura 5-32 – Espectro de energia da zirconita | 91 |
| Figura 5-33 – Espectro de energia da derbylita?..... | 92 |
| Figura 5-34 – Espectro de energia da magnesita | 92 |
| Figura 5-35 – Média dos teores de MnO nas magnesitas, com os respectivos intervalos de confiança para 95%..... | 94 |
| Figura 5-36 – Média dos teores de CaO nas magnesitas com os respectivos intervalos de confiança para 95%..... | 95 |
| Figura 5-37 – Média dos teores de FeO nas magnesitas com os respectivos intervalos de confiança para 95%..... | 95 |
| Figura 5-38 – Elétron-micrografias da amostra TJ-A, após a queima, mostrando a desagregação intragranular..... | 100 |
| Figura 5-39 – Elétron-micrografias das amostras TPP-A (linha superior) e TP-B (linha inferior), após a queima, mostrando a desagregação intergranular... | 101 |
| Figura 5-40 – Mapa índice das amostras na primeira batelada de queima..... | 102 |
| Figura 5-41 – Situação das amostras da primeira batelada antes da queima..... | 103 |
| Figura 5-42 – Situação das amostras da primeira batelada depois da queima..... | 103 |
| Figura 5-43 – Mapa índice das amostras na segunda batelada de queima. | 104 |
| Figura 5-44 – Situação das amostras da segunda batelada antes (acima) e depois da queima (abaixo). | 104 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5-45 – Elétron-micrografias de fragmentos de magnesita queimada mostrando a microestrutura e o comportamento à queima. | 109 |
| Figura 5-46 – Diferenças de tamanho dos agregados de cristalitos. | 111 |
| Figura 5-47 – Variação do grau de sinterização nas amostras estudadas. | 112 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 3-1 – Dados de refinamento de estrutura por raios-X para a magnesita. | 3 |
| Tabela 3-2 – Produção mundial de magnesita e reservas. | 11 |
| Tabela 3-3 – Reservas de magnesita do Brasil em 2000. | 12 |
| Tabela 3-4 – Especificação do produto obtido a partir de magnesita em função de sua aplicação | 17 |
| Tabela 3-5 – Características químicas dos minérios e estéreis. | 31 |
| Tabela 3-6 – Características típicas dos sínteres produzidos pela Magnesita S.A. | 35 |
| Tabela 4-1 – Rotina para análise de carbonatos, talco e clorita. | 54 |
| Tabela 4-2 – Rotina para análise de hematitas. | 54 |
| Tabela 5-1 – Amostras estudadas com respectivas codificações. | 55 |
| Tabela 5-2 – Resultados de análises químicas por FRX efetuadas no CPqD da Magnesita S. A. | 56 |
| Tabela 5-3 – Análises químicas qualitativas (varredura completa) por FRX efetuadas no CDTN. | 56 |
| Tabela 5-4 – Resultado de análises por difratometria de raios-X. | 58 |
| Tabela 5-5 – Parâmetros da estrutura cristalina obtidos pelo método Rietveld. | 58 |
| Tabela 5-6 – Resumo das características microscópicas. | 61 |
| Tabela 5-7 – Mineralogia da amostra TJ. | 63 |
| Tabela 5-8 – Mineralogia da amostra TP. | 65 |
| Tabela 5-9 – Mineralogia da amostra TPP. | 67 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 5-10 – Mineralogia da amostra PP-704..... | 69 |
| Tabela 5-11 – Mineralogia da amostra PP-RGF..... | 71 |
| Tabela 5-12 – Mineralogia da amostra PP-BGF..... | 73 |
| Tabela 5-13 – Resumo de análises termogravimétrica (TG) e termodiferencial... | 81 |
| Tabela 5-14 – Microanálises efetuadas nas regiões marcadas na Figura 5-24B.... | 84 |
| Tabela 5-15 – Médias de análises em hematitas | 87 |
| Tabela 5-16 – Médias de análises em cloritas | 88 |
| Tabela 5-17 – Médias de análises em talco | 89 |
| Tabela 5-18 – Médias de análises em dolomita | 90 |
| Tabela 5-19 – Médias de análises em magnesitas brancas | 93 |
| Tabela 5-20 – Médias de análises em magnesitas incolores..... | 93 |
| Tabela 5-21 – Médias de análises em magnesitas vermelhas | 94 |
| Tabela 5-22 – Esquema de aquecimento nos testes de queima | 97 |
| Tabela 5-23 – Resultado do primeiro ciclo de testes de queima..... | 98 |
| Tabela 5-24 – Perda ao fogo (PF) após queima por 2h a 1000°C..... | 99 |
| Tabela 5-25 – Resultados do segundo ciclo de testes de queima..... | 106 |
| Tabela 5-26 – Resultados do segundo ciclo de testes de queima (Continuação da Tabela 5-25) | 107 |

Lista de abreviaturas

| | |
|------|---|
| AMB | Anuário Mineral Brasileiro |
| CDTN | Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear |
| CL | Catodoluminescência |
| CNEN | Comissão Nacional de Energia Nuclear |
| CPqD | Centro de Pesquisa e Desenvolvimento |
| DDTA | Análise termodiferencial derivada |
| DRX | Difratometria de raios-X |
| DTA | Análise termodiferencial |
| DTG | Análise termogravimétrica diferencial |
| EDS | Espectrometria por Dispersão de Energia |
| ETR | Elementos das Terras Raras |
| ICDD | International Center for Diffraction Data |
| IF | Inclusões fluidas |
| IMA | International Mineralogical Association |
| LMA | Laboratório de Microanálises do Consórcio UFMG/CDTN |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| MO | Microscopia Óptica |
| PF | Perda ao fogo |
| SiLi | Detector Silício-Lítio |
| TG | Análise termogravimétrica |
| UFMG | Universidade Federal de Minas Gerais |
| UFOP | Universidade Federal de Ouro Preto |
| USGS | United States Geological Survey |
| WDS | Espectrometria por Dispersão de Comprimento de Onda |

Lista de minerais referidos no texto

| Mineral | Fórmula Cristaloquímica | Sistema Cristalino |
|------------------------|--|---------------------------|
| Actinolita | $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5[\text{OH} \text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$ | Monoclínico |
| Água-marinha | Variedade de berilo com ferro II, que lhe confere a cor azul. | |
| Albita | $(\text{Na,Ca})[(\text{Si,Al})_4\text{O}_8]$ | Triclínico |
| Apatita | $\text{Ca}_5(\text{F,Cl,OH})(\text{PO}_4)_3$ | Hexagonal |
| Berilo | $\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ | Hexagonal |
| Breunnerita | Magnesita rica em ferro | Trigonal |
| Brucita | $\text{Mg}(\text{OH})_2$ | Trigonal |
| Calcedônia | Variedade criptocristalina de quartzo | |
| Calcita | $\text{Ca}[\text{CO}_3]$ | Trigonal |
| Carnalita | $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | Ortorrômico |
| Caulinita | $\text{Al}_4[(\text{OH})_8 \text{Si}_4\text{O}_{10}]$ | Triclínico |
| Cianita | $\text{Al}^{[6]}\text{Al}^{[6]}[\text{O} \text{SiO}_4]$ | Triclínico |
| Clinocloro | $(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Al})_3[(\text{OH})_2 \text{AlSi}_3\text{O}_{10}] \cdot (\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Al})_3(\text{OH})_6$ | Monoclínico |
| Clorita * | $\text{A}_{5-6}\text{T}_4\text{O}_{10}\text{Z}_8$ onde A= Al, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Li, Mg, Mn, Ni; T= Al, Fe^{3+} , Si; Z= O e/ou OH | Monoclínico |
| Derbylita | $\text{Fe}_4^{3+}\text{Tl}_3^{4+}\text{Sb}^{3+}\text{O}_{13}(\text{OH})$ | Monoclínico |
| Dolomita | $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ | Trigonal |
| Epidoto | $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+},\text{Al})\text{Al}_2[\text{O} \text{OH} \text{SiO}_4 \text{Si}_2\text{O}_7]$ | Monoclínico |
| Esmeralda | Variedade de berilo com cromo e ferro, com a cor verde. | |
| Espodumênio | $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ | Monoclínico |
| Fayalita | $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ Grupo da olivina | Ortorrômico |
| Forsterita | $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ Grupo da olivina | Ortorrômico |
| Granada | $\text{X}_3^{[8]}\text{Y}_2^{[6]}[\text{SiO}_4]_3$ onde X=Ca,Fe,Mn; Y=Al, Cr etc. | Cúbico |
| Hematita | Fe_2O_3 | Trigonal |
| Hortonolita | Variedade de fayalita com Mg e Mn | |
| Magnesioferrita | $\text{MgFe}_2^{3+}\text{O}_4$ | Cúbico |

| | | |
|------------------------|---|------------------------------|
| Magnesita | Mg[CO ₃] | Trigonal |
| Martita | Hematita pseudomorfa de magnetita | |
| Monazita-(Ce) * | (Ce, La, Nd,Th)[PO ₄] | Monoclínico |
| Monticellita | CaMg[SiO ₄] | Ortorrômbico |
| Olivina | Ver forsteria e fayalita | |
| Periclásio | MgO | Cúbico |
| Pirita | FeS ₂ | Cúbico |
| Pistomesita | Siderita magnesiana | |
| Quartzo | SiO ₂ | Trigonal |
| Rutilo | TiO ₂ | Tetragonal |
| Siderita | Fe[CO ₃] | Trigonal |
| Talco | Mg ₃ [(OH) ₂ Si ₄ O ₁₀] | Monoclínico ou Triclínico |
| Titanita | CaTi[O SiO ₄] | Monoclínico |
| Topázio | Al ₂ ^[6] [(F,OH) ₂ SiO ₄] | Ortorrômbico |
| Tremolita | Ca ₂ Mg ₅ [(OH,F) Si ₄ O ₁₁] ₂ | Monoclínico |
| Turmalina | X ^[9] Y ₃ ^[6] Z ₆ ^[6] [(OH,F) (OH,O) ₃ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈] onde: X=Ca, Na, K; Y=Al, Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Li, Mg, Mn ²⁺ , Zn, Cu ; Z=Al, Cr ³⁺ , Mg, Fe ³⁺ , Cr ³⁺ , V ³⁺ | Trigonal |
| Xenotima | Y[PO ₄] | Tetragonal |
| Zirconita | Zr[SiO ₄] | Tetragonal |

Todas as fórmulas cristalóquímicas encontradas em Strunz e Nickel (2001), exceto *, encontrada em Mineral Databases (2004). Em **negrito** nomes aprovados pela IMA.

Resumo

Na planta de Brumado, BA, magnesita em fragmentos com tamanho entre 70,0mm e 28,6mm é queimada em fornos de carregamento vertical, num processo de calcinação e sinterização denominado monoqueima, para a produção de magnésia calcinada à morte (ou sínter magnésiano). Alguns minérios se prestam bem a esse processo, enquanto outros sofrem desagregação; esta degradação do minério se denomina decrepitação. Os finos gerados diminuem a permeabilidade aos gases, dificultando a calcinação e, conseqüentemente, diminuindo a produção do forno. Os operadores do forno têm um conhecimento empírico do comportamento dos diversos minérios disponíveis e evitam a utilização daqueles que podem, potencialmente, causar problemas. Não se conhecem, todavia, as causas do fenômeno. As características mineralógicas, físicas e químicas de amostras de minério e de produtos obtidos em testes de queima que simulam o processo de monoqueima são estudadas com o auxílio de diversas técnicas analíticas. O objetivo foi encontrar características que permitissem entender o fenômeno de tal modo a se poder fazer uma utilização racional e consciente da matéria-prima. À luz dos resultados conclui-se que a principal responsável pela manutenção da integridade mecânica do minério (a não decrepitação) é a sinterização acelerada (ou facilitada) por elementos constituintes dos minérios com comportamento aceitável. Esses elementos são o Mn, o Fe^{3+} e o Ti. Outrossim contatos endentados entre os cristais de magnesita também são considerados como tendo efeito positivo na diminuição da decrepitação. Por outro lado, considera-se o baixo teor em Mn e a presença de Ca e Fe^{2+} , além de contatos simples entre cristais, como facilitadores da decrepitação.

Abstract

At the Brumado plant, magnesite fragments ranging in size from 70,0mm down to 28,6mm, are burned in kilns, in a calcination and sinterization process known as single burning, to produce dead-burned magnesite (magnesian sinter). Some ores are quite suitable to this process while others are disintegrated down to a powder. This degradation of the ore is called decrepitation. The fines that are produced in this way decrease the permeability to the gases, slowing down the calcination and, consequently, the furnace production. The kiln operators acquired an empirical knowledge of the different available ores behavior during the burning so that they avoid the usage of those that can potentially cause any harm. However, the causes of the phenomenon are unknown. The mineralogical, physical and chemical characteristics of ore samples and products from burning tests that simulate the single burning process are studied with the help of several analytical techniques. The aim of this study was to find out characteristics that could possibly contribute to the understanding of the problem in such a way that the raw materials could have a more rational and conscious usage. The results obtained lead to the conclusion that the main responsible for the keeping of the ore's mechanical integrity after burning is the initial sintering made easier by some elements that are present in the ores that have an acceptable behavior. These elements are Mn, Fe^{3+} and Ti. Also, the indented contact between the magnesite crystals is considered to have a positive effect in decreasing decrepitation. On the other way, the low content of Mn and the presence of Ca and Fe^{2+} and straight contacts are considered to favor decrepitation.

1. INTRODUÇÃO

O magnésio é o oitavo mais abundante dentre os elementos que formam a crosta terrestre, constituindo 2% da mesma e ocupando, ainda, a terceira posição dentre os elementos dissolvidos na água dos mares. Embora seja encontrado em mais de 60 minerais, somente dolomita, magnesita, brucita, periclásio (MgO), carnalita e olivina (forsterita) podem ser de importância comercial. Magnésio e seus compostos são também extraídos a partir de água do mar e salmouras de poços e lagos. A produção comercial a partir de magnesita, no entanto, é no presente a mais econômica.

A principal utilização do magnésio, normalmente sob a forma de óxido, é como material refratário em revestimento de fornos para a produção de ferro e aço, metais não-ferrosos, vidro e cimento. Óxido de magnésio e outros compostos são ainda usados em agricultura, indústria química e na construção. Em ligas com o alumínio, o magnésio é usado em componentes estruturais de automóveis, máquinas e latas para bebidas.

A maior parte da produção mundial de magnesita provém da China, Coréia do Norte, Rússia e Turquia. Juntos, estes quatro países responderam por 63% da produção mundial deste insumo mineral no ano de 2003. O Brasil tem a totalidade de suas grandes reservas conhecidas de magnesita concentradas no nordeste do país, mais especificamente nos estados da Bahia e Ceará. No município de Brumado-BA, na Serra das Éguas, estão as maiores reservas e as mais produtivas minas conhecidas deste bem em nosso país, que respondeu por cerca de 3% da produção mundial em 2001.

Fontes, a partir das quais compostos de magnésio podem ser recuperados, variam de grandes a virtualmente ilimitadas e são globalmente distribuídas. A abundância na oferta, a retração na demanda e a globalização das relações comerciais fazem com que seja cada vez mais importante a qualidade do bem mineral que se promove.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

O objetivo desta tese é realizar a caracterização mineralógica dos minérios de magnesita típicos do conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba, utilizando-se técnicas tais como análise química instrumental, difração de raios-X, microscopia óptica (em luz transmitida, refletida, estudo de inclusões fluidas e catodoluminescência), microscopia eletrônica de varredura, microanálise eletrônica e análises térmicas.

Será dada ênfase para a química mineral e aspectos mineralógicos e texturais, visando não só a melhoria do conhecimento das características necessárias para um melhor aproveitamento e real conhecimento das reservas mas também para servir de subsídio ao entendimento da gênese e metalogênese e do comportamento termomecânico da magnesita durante o processo de monoqueima.

Do ponto de vista acadêmico, pouco se conhece sobre a gênese dos depósitos da Serra das Éguas. Embora não seja objetivo deste trabalho estudar especificamente este tema, o conhecimento detalhado da química mineral dos diversos tipos de minério da área e o estudo das inclusões fluidas poderão fornecer subsídios importantes para o entendimento dos eventos formadores das jazidas. Outrossim, a identificação das características mineralógicas, químicas e texturais dos minérios, combinada com testes de queima, poderão trazer importante contribuição para o entendimento do comportamento termomecânico da magnesita, mais especificamente sobre o fenômeno de decrepitação durante a monoqueima.

Do lado comercial, tendo em vista que a indústria de refratários, o maior consumidor de compostos de magnésio, atualmente se caracteriza por uma retração na demanda e que, para cortar custos de produção, os usuários de refratários estão demandando materiais de mais alta qualidade e que tenham uma vida útil mais longa nos fornos, cada vez mais se faz necessário o conhecimento mais detalhado da matéria-prima. A caracterização mineralógica, como ferramenta na busca de qualidade, leva a um inevitável aumento de competitividade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – ASPECTOS MINERALÓGICOS

A magnesita pertence à família dos carbonatos do grupo da calcita, minerais que têm como unidade aniônica fundamental da estrutura o grupo $(\text{CO}_3)^{2-}$. A ligação desta unidade com os elementos catiônicos é essencialmente iônica (Palache, Berman e Frondel, 1963).

O nome magnesita é uma alusão à sua composição. Contém 47,81% de MgO e 52,19% de CO_2 . Ferro pode substituir o magnésio em grande extensão, porém magnesitas naturais, como regra, são pobres neste elemento. Magnesita com cerca de 9% de FeO é denominada breunnerita; quando ainda mais rica em ferro, transicional para siderita, é a pistomesita. Pequenas quantidades de Ca e Mn são também encontradas, porém, miscibilidade com CaCO_3 e MnCO_3 é limitada (Kostov, 1968).

Cristalograficamente, a magnesita é isoestrutural com a calcita, sendo ditrigonal-escalenoedra, $R\bar{3}c$, com $a = 4,637\text{\AA}$, $c = 15,023\text{\AA}$ e $Z = 2$ (Kostov, 1968). Na Tabela 3-1 mostram-se dados de refinamento de estrutura por raios-X, para a magnesita, adaptada de Reeder (1983) e incluindo um dado de Zemann (1989).

Tabela 3-1 – Dados de refinamento de estrutura por raios-X para a magnesita.

Fonte: Adaptada de Reeder (1983).

| a (\AA) | c (\AA) | M-O (\AA) | Composição |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 4,6328 | 15,0129 | 2,1018 | (1) |
| 4,637 | 15,023 | 2,105 | (2) |
| 4,635 | 15,019 | - | (3)* |

Composição das magnesitas utilizadas: (1) $\text{Mg}_{0,99}\text{Fe}_{0,01}\text{CO}_3$; (2) MgCO_3 (sintética); (3) magnesita de Brumado com 0,1% CaO, 0,6% FeO, 0,7% MnO (* Dado de Zemann, 1989).

A Figura 3-1 ilustra as relações entre a verdadeira célula unitária romboedral e a célula morfológica (ou de clivagem). Observe-se que a altura da célula unitária é o dobro da altura da célula morfológica (Reeder, 1983).

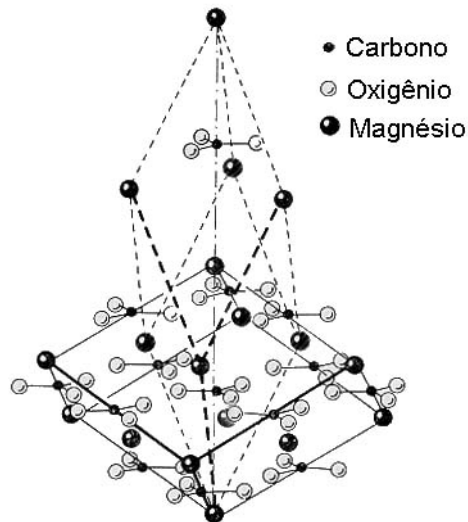


Figura 3-1 – Estrutura da magnesita.

Fonte: Adaptada de Kostov (1968).

Magnesita tem como raias de difração de raios-X mais intensas as seguintes: 2,737 com 100%, 2,101 com 90%, 1,935 com 60%, 1,697 com 100%, 1,252 com 60% e 1,336 com 70%, (Kostov, 1968).

Mostra clivagem $\{10\bar{1}1\}$ perfeita, tem dureza 4 e densidade 3,00. É incolor a branca e seu índice de refração varia de acordo com o seu teor de ferro. Opticamente é um mineral uniaxial negativo, em acordo com o arranjo em leitos dos grupos planares CO_3 paralelos a $\{0001\}$ (Kostov, 1968).

3.2 – TIPOS DE DEPÓSITO DE MAGNESITA

Magnesita ocorre em muitos ambientes geológicos, tanto passados como atuais. Redlich (1909), citado em Pohl e Siegl (1986), baseado nas ocorrências conhecidas na Áustria, tenta descrever os depósitos de magnesita agrupando-os em três tipos básicos. Posteriormente, foi agregado a esse grupo um quarto tipo estabelecido por Ilic (1968), também citado em Pohl e Siegl (1986). Assim, embora reconhecendo que uma classificação quase sempre implica em

simplificações, e que os quatro diferentes tipos nem sempre podem ser diferenciados claramente, Pohl e Siegl (1986) apresentam as seguintes características distintivas para esses quatro tipos.

3.2.1 – Tipo Veitsch - (Depósitos de magnesita macrocristalina)

São caracteristicamente formados por grandes, porém curtas, lentes de magnesita de granulação grossa em sedimentos marinhos clásticos de plataforma, de idade Proterozóica-Paleozóica, consistindo de dolomitos, calcários, folhelhos, arenitos, conglomerados e, não raramente, rochas meta-vulcânicas básicas. Podem ser levemente ou fortemente deformados, com grau de metamorfismo variando de muito baixo, passando pelo fácies xisto-verde, até anfibolito alto. As reservas podem ser muito grandes, tipicamente da ordem de dezenas de milhões de toneladas (nos depósitos da Áustria), até a ordem de 1 bilhão de toneladas (depósitos da China). Muitas estruturas sedimentares têm sido observadas nas rochas magnesíticas deste tipo. Sinais de dolomitização progressiva e magnesitização são observados no depósito de Veitsch.

Os depósitos do tipo Veitsch são caracterizados por um elevado conteúdo de ferro, manganês da ordem de um décimo do seu teor em ferro, baixa alumina, e sílica e cal variáveis em função do conteúdo de quartzo, talco e dolomita. A textura é tipicamente granuloblástica, com cristais milimétricos a centimétricos

Grandes depósitos deste tipo ocorrem mundialmente, embora sejam relativamente escassos na América do Norte, na África e na Austrália continental. As maiores jazidas conhecidas encontram-se na Áustria, Espanha, Eslováquia, China, Coreia, Rússia e no **Brasil**.

Muitos dos depósitos têm uma notável semelhança uns aos outros, o que pode indicar um mecanismo comum de formação (Duncan e McCracken, 1994). Em alguns desses grandes depósitos a magnesita parece ser associada, tanto espacial como cronologicamente, com atividade intrusiva de material magmático (Bain, 1924; Bodenlos, 1954; Duncan e

McCracken, 1994, mencionando Siegfus, 1927), o que leva tais autores a verem aí a provável fonte de magnésio que teria propiciado a formação da magnesita a partir de calcáreos e/ou dolomitas.

Bodenlos (1954) sugere, para a etapa principal de mineralização dos depósitos da Serra das Éguas, temperaturas de formação na faixa de 200 a 300°C, ou mais altas. Já Schroeder (1948), mencionado por Duncan e McCracken (1994), sugere para os depósitos de magnesita de Stevens County, Washington, USA, temperaturas de formação da ordem de 300 a 500°C.

3.2.2 – Tipo Kraubath (Depósitos de magnesita microcristalina)

Veios, “stockworks”, corpos irregulares e capeamentos de magnesita criptocristalina são freqüentemente associados com zonas de fraturas afetando rochas ultramáficas que compreendem principalmente dunitos, peridotitos e serpentinitos. Essas rochas freqüentemente fazem parte de uma suite ultramáfica de ofiolitos. Esta magnesita pode conter pequenas concentrações de cálcio e traços de ferro e manganês substituindo o magnésio. O baixo teor em ferro das magnesitas deste tipo é uma característica contrastante com relação às magnesitas do tipo Veitsch.

As principais ocorrências deste tipo encontram-se na Grécia, Turquia, ex-Iugoslávia, Austrália e Estados Unidos.

3.2.3 – Tipo Greiner

A magnesita resulta da alteração hidrotermal sobre rochas básicas-ultrabásicas, devida à ação de soluções carbonatadas, em condições de baixo metamorfismo, que provoca a transformação dos silicatos magnesianos em carbonato de magnésio com conseqüente liberação de sílica. A exploração do depósito de Deloro Township, em Timmins, Ontário, Canadá, resultou em um conhecimento mais detalhado deste tipo de magnesita caracterizado por: concentrações relativamente altas de ferro, pouco cálcio, mas cerca de 25% de sílica.

3.2.4 – Tipo Bela Stena

Corpos de magnesita lentiformes ou de formato irregular ocorrendo dentro de sedimentos lacustrinos clásticos de idade Terciária. Falhamento sinsedimentar da bacia dos lagos, proximidade de atividade vulcânica, atividade hidrotermal, e, raramente, também evaporação, se combinam para produzir rápidas variações de fácies tanto lateral como verticalmente.

Nestes depósitos as reservas de magnesita são da ordem de poucos milhões de toneladas, podendo, porém, atingir valores da ordem de até 400 milhões de toneladas. Raramente, no entanto, alcançam as atuais necessidades de qualidade. Os principais depósitos do tipo encontram-se na ex-Iugoslávia, Grécia e Turquia.

Além dos tipos apontados, Pohl e Siegl (1986) ressaltam, também, a ocorrência de magnesita em ambientes sedimentares recentes. Tal é o caso da formação de magnesita em evaporitos marinhos, em sabkhas e em lagos salgados continentais e costais (playas), em regiões áridas e semi-áridas. Embora importantes do ponto de vista do entendimento da formação da magnesita, essas ocorrências são de quantidade e qualidade sub-econômicas.

Embora a magnesita ocorra em uma ampla variedade de ambientes geológicos, conforme explanado anteriormente, somente dois tipos principais de depósitos são explorados atualmente. Esses incluem as magnesitas criptocristalinas associadas com rochas magmáticas ultramáficas, as quais são usualmente a fonte de magnésio, bem como as hospedeiras dos depósitos (o “Tipo Kraubath”) e as magnesitas macrocristalinas formando lentes localizadas ou stocks dentro de carbonatos de plataformas marinhas antigas (o “Tipo Veitsch”).

Os depósitos de magnesita do tipo Veitsch são, de longe, os maiores e os mais importantes jazimentos de magnesita no mundo. Os depósitos da Serra das Éguas se incluem entre estes. Em vista disso apresenta-se, a seguir, uma pequena revisão sobre a gênese de alguns depósitos desse tipo.

Bain (1924) sugere que os depósitos de magnesita de Styria, Áustria, se formaram como calcários normais que foram magnesitizados através de soluções portadoras de magnésio, emanadas de um magma granítico.

Niinomy (1925), que estudou os depósitos descobertos no sul da Manchuria, China, sugere a substituição do cálcio, de dolomita préexistente, pelo magnésio contido em soluções lixiviadas de xistos magnesianos, soluções portadoras de magnésio supridas por um dique de diabásio pórfiro ou, finalmente, soluções provindas de granitos.

Kato (1929) relata ter encontrado evidências que corroborariam a sugestão de Niinomy e conclue afirmando acreditar que os depósitos de magnesita do sul da Manchuria foram formados pela substituição de calcáreo magnesiano através da ação de soluções hidrotermais contendo bastante magnésia. Tais soluções seriam líquidos residuais representando o estágio final de solidificação magmática.

Nishihara (1956), que já havia discordado anteriormente da teoria de Niinomy (Nishihara, 1925, apud Nishihara, 1956), mantém sua posição sugerindo que a origem da magnesita da Manchuria por processos hidrotermais não estava de acordo com observações sobre a geoquímica do magnésio. Segundo este autor, observações de campo e experiências químicas sugeriam que a magnesita teria sido precipitada diretamente a partir das águas de mares pré-cambrianos rasos ou lagoas, em um ambiente de clima árido ou semi-árido.

Quemeneur (1974), que fez sua tese de doutorado estudando as jazidas de magnesita de Eugui, no País Basco, encontra razões e evidências para advogar a origem da magnesita em um ambiente de sabka (fácies de meio confinado penesalino a evaporítico).

Pohl e Siegl (1986) concluem que a maioria dos depósitos de magnesita do tipo Veitsch são, provavelmente, de origem sedimentar-diagenética. A fonte do Mg^{2+} foi água do mar contemporânea, a qual era continuamente enriquecida em Mg^{2+} pela perda de Ca^{2+} devido à rápida precipitação orgânica e/ou inorgânica do mesmo.

Velasco et al. (1987), que também estudaram os depósitos de magnesita de Eugui, ressaltando o conflito entre hipóteses de substituição metassomática e de processos sedimentares, discordam de Quemeneur (1974) e sugerem substituição metassomática de dolomita por magnesita durante a diagênese (metassomatismo diagenético) em um ambiente de plataforma epicontinental.

Pohl (1990), numa revisão de modelos e tendências para a origem dos depósitos de magnesita, conclui que a maioria dos dados sobre depósitos do tipo Veitsch dão suporte à uma origem sedimentar química-bioquímica a diagenética precoce, enxergando mesmo similaridades estreitas entre a gênese da magnesita e de evaporitos do tipo cloreto.

Kiesl, Koeberl e Körner (1990) estudando a geoquímica dos depósitos de magnesita e dolomita de Oberdorf/Laming (Styria, Áustria) concluem pela hipótese da atuação de processos metassomáticos. O material teria se depositado, originalmente, como calcários que seriam dolomitizados e posteriormente magnesitizados pela ação de soluções ricas em magnésio circulando através da rocha. Acreditam que esses fluídos podem ter advindo de massas rochosas básicas e ultrabásicas de grande profundidade.

Joshi, Bhattacharya e Anantharaman (1993) estudaram depósitos de magnesita macrocristalina próximos a Bauri, distrito de Almora, em Uttar Pradesh, Índia. Invocando a ausência de minerais evaporíticos associados ou de pseudomorfos de magnesita, a falta de enriquecimento em álcalis e de isótopos pesados, negam a possibilidade de ambiente evaporítico durante a magnesitização. Os depósitos da área estudada teriam, então, se formado a partir da precipitação de um carbonato de cálcio posteriormente dolomitizado e finalmente sofrendo substituição metassomática diagenética da dolomita por magnesita. A granulação grossa pode ser atribuída à lenta razão de crescimento dos cristais durante o prolongado metassomatismo.

Ellmies et al. (1999) ao estudarem os depósitos gigantes de magnesita de Satka, no mega-anticlinal de Bashkir, nos Urais, Rússia, concluem que a formação da magnesita se deu por maturação metamórfica e diagenética de seqüência carbonática e siliciclástica, e parece ter sido controlada, principalmente, pelo

ambiente paleogeográfico e pela história diagenética dos carbonatos marinhos de mar raso. Os aspectos geológicos e geoquímicos observados por estes autores são melhor explicados por um modelo que implica em refluxo de salmouras ricas em magnésio através de dolomitos porosos e brechados.

Como se pode ver, embora hajam similaridades entre esses depósitos, o que pode sugerir uma origem semelhante, não há unanimidade quanto a sua gênese. Em um ponto todos os autores citados parecem concordar: a origem sedimentar dos depósitos. A maioria discorda da possibilidade de precipitação direta de magnesita e invocam a metassomatose. Aí aparecem duas correntes: a dos que advogam a metassomatose por ação magmática direta ou indireta, e a dos que acreditam na metassomatose diagenética ou sindiagenética.

A menos da hipótese de sedimentação direta da magnesita, as outras hipóteses citadas têm como mecanismo básico a adição de Mg^{2+} a um carbonato precursor. Kralic et al.(1989), citando Johannes (1966, 1970), Mostler (1973) e Morteani et al. (1983), mencionam uma terceira possibilidade pouco invocada: a perda de Ca por carbonatos ricos em magnésio (Mg-calcita ou dolomita) associada ou combinada com recristalização metamórfica, resultando em magnesita macrocristalina.

Certamente muita pesquisa ainda terá que ser feita para se poder concluir quanto à gênese dessas magnesitas.

3.3 – PRODUTORES E RESERVAS

A maior parte da atual produção mundial de magnesita provém da China, Coréia do Norte, Rússia e Turquia. Juntos estes quatro países responderam por cerca de 63% da produção mundial deste insumo mineral no ano de 2003. A Tabela 3-2 mostra a produção e as reservas mundiais conhecidas de magnesita.

Fontes, a partir das quais compostos de magnésio podem ser recuperados, variam de grandes a virtualmente ilimitadas e são globalmente distribuídas. Fontes

identificadas de magnesita totalizam 12 bilhões de toneladas. Fontes de brucita, dolomita, forsterita e evaporitos contendo magnésio são enormes e estima-se que salmouras contendo magnésio constituam uma fonte de bilhões de toneladas. Com o aumento do custo dos combustíveis, há uma distinta vantagem, no entanto, na conversão de magnesita natural em MgO, ao invés de se produzir magnésia a partir da água do mar ou salmouras (Duncan e McCracken, 1994).

Tabela 3-2 – Produção mundial de magnesita e reservas.

Fonte: Adaptada de USGS Mineral Commodity Summaries, January 2004 e

* Sumário Mineral 2003 - DNPM

| País | Produção | | Reserva Medida |
|-----------------|------------|-------------------|----------------|
| | 2002 | 2003 ^e | 2002 |
| Austrália | 140 | 140 | 100.000 |
| Áustria | 202 | 200 | 15.000 |
| Brasil * | 270 | ND | 180.000 |
| China | 1.070 | 1.100 | 380.000 |
| Coréia do Norte | 288 | 290 | 450.000 |
| Eslováquia | 144 | 140 | 41.000 |
| Espanha | 151 | 150 | 10.000 |
| Estados Unidos | ND | ND | 10.000 |
| Grécia | 144 | 140 | 30.000 |
| Índia | 110 | 110 | 14.000 |
| Rússia | 288 | 300 | 650.000 |
| Turquia | 576 | 580 | 65.000 |
| Outros países | 126 | 130 | 390.000 |

Dados em 10³ toneladas métricas de magnésio contido; e = estimado; ND = Não disponível

Segundo Duncan e McCracken (1994), o maior depósito de magnesita da China está localizado a aproximadamente 65km ao sul/sudeste da cidade metalúrgica de Anshan, na província de Liaoning, um distrito da antiga Manchúria. Os depósitos da Rússia estão localizados em Satka, no sul dos montes Urais e no leste da Sibéria, nas montanhas Savan. A Coreia do Norte tem suas reservas principais na província de Kankyo. A Turquia tem seus principais depósitos de magnesita cristalina na região do Mar Negro, além de importantes reservas de magnesita criptocristalina nas regiões de Eskisehir e Kutaya. Na Grécia é em Vavdos, península de Khalkidiki, na Thessalonika, que se localizam os depósitos de magnesita criptocristalina. Os mais importantes depósitos da Áustria estão localizados em Semmering, Veitsch, Breitenau Trieben, Radentheim e Dientin. A Espanha tem, na província de Navarra, próximo da fronteira com a França, os seus principais depósitos. A Índia tem seus depósitos maiores em Salem, um distrito do estado de Madras e no distrito de Almora, em Uttar Pradesh. Em Kosice, Jelsava e Lobinobana estão as principais reservas da Eslováquia. A Austrália tem depósitos de magnesita criptocristalina em Kunwarara em Queensland, Fifield e Young em New South Wales e Ravensthorpe em Western Australia.

O Brasil tem a totalidade de suas grandes reservas de magnesita conhecidas até o momento, concentradas no nordeste do país, mais especificamente nos estados da Bahia e Ceará (Bodenlos, 1950, 1954). A Tabela 3-3 mostra dados sobre as reservas brasileiras.

Tabela 3-3 – Reservas de magnesita do Brasil em 2000.

Fonte: Adaptada do Balanço Mineral Brasileiro 2001 – DNPM

| Estado/Município | Reservas | | |
|--------------------|----------------|---------------|---------------|
| | Medida | Indicada | Inferida |
| Bahia | 154.508 | 79.566 | 13.320 |
| Ceará | 25.492 | 16.868 | 247 |
| Total Geral | 180.000 | 96.434 | 13.567 |

Dados em 10³ toneladas métricas de magnésio contido.

Conforme se vê no Balanço Mineral Brasileiro (2001), a Bahia é detentora de cerca de 85% das reservas brasileiras de magnesita conhecidas até o presente. Os mais importantes jazimentos estão situados no município de Brumado, na Serra das Éguas, destacando-se as minas de Pedra Preta, Jatobá e Pomba. Embora essas ocorrências sejam conhecidas desde as últimas décadas do século 19, a efetiva produção das minas só começou em 1945 através da empresa Magnesita S.A.

É notável a diferença entre os dados do USGS e do Balanço Mineral Brasileiro (BMB) para as reservas brasileiras. Só a reserva medida para a Bahia (de acordo com o BMB) tem mais do triplo da reserva informada pelo USGS. É possível que tal diferença seja devida à diferentes interpretações dos conceitos de reservas. Grossi e Valente (2003) apresentam definições bem claras sobre esses conceitos. Veja-se no Anexo C um condensado do trabalho mencionado. Devido à discrepância dos dados utilizam-se, na Tabela 3-2, os dados do Sumário Mineral do DNPM de 2003 para as reservas e produção brasileiras. Para os outros países usam-se os dados do USGS.

A Figura 3-2, adaptada de Pohl e Siegl (1986) mostra a distribuição dos depósitos de magnesita em todo o mundo, conhecidos até 1986. Faz-se uma tentativa de mostrar, também, o tamanho das reservas e, ainda, o tipo do depósito.

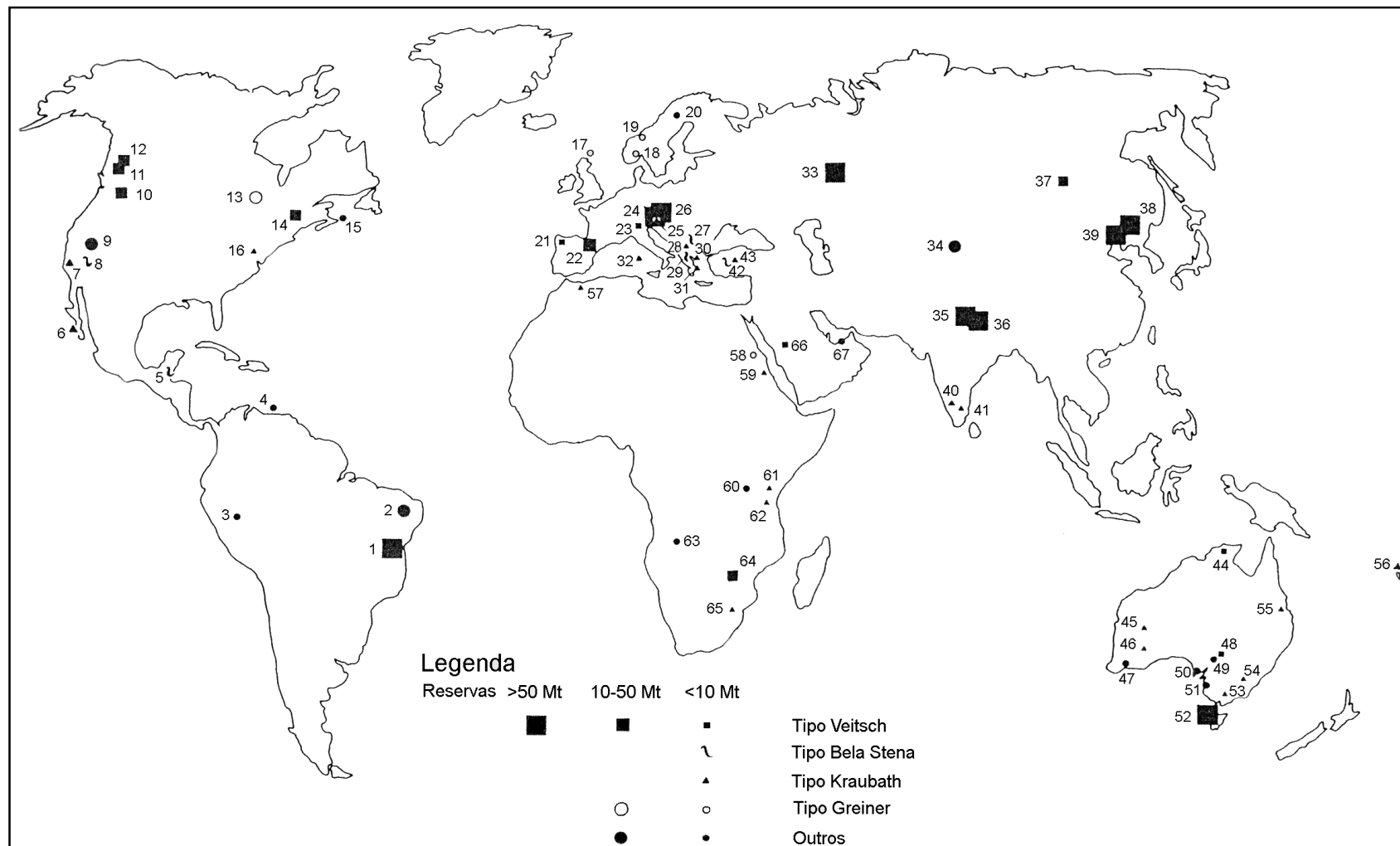


Figura 3-2 – Localização de depósitos de magnesita no mundo.

Fonte: Adaptada de Pohl e Siegl (1986). Ver na próxima página a relação dos depósitos assinalados.

Relação dos depósitos assinalados na Figura 3-2

Américas do Sul e Central: 1 = Brumado, Serra das Éguas, Brasil, 2 = Iguatu, Brazil, 3 = Alto Chapare, Bolívia, 4 = Isla Margarita, Venezuela, 5 = Guatemala, 6 = Sta. Margarita Island, México.

América do Norte: 7 = Coast Ranges, Calif., 8 = Kern County, Nev., 9 = Gabbs, Nev., 10 = Stevens County, Wash., 11 = Marysville, B.C., 12 = Radium Hot Springs, B.C., 13 = Deloro, Ont., 14 = Kilmar, Que., 15 = Cape Breton Island, New Scotland, 16 = Maryland, USA.

Europa: 17 = Shetlands, UK, 18 = Snarum, Noruega, 19 = Trondheim, Noruega, 20 = Norbotten, Suécia, 21 = Pacios, Espanha, 22 = Eugui, Espanha e Pirineus, 23 = Ortler, Itália, 24 = Graywacke Zone, Áustria, 25 = Kraubath, Áustria, 26 = Eslováquia, 27 = Bela Stena, Iugoslavia, 28 = Serbia, Iugoslávia, 29 = Servia Basin, Grécia, 30 = Vavdos, 31 = Euboea, Grécia, 32 = Elba, 33 = Satka, Rússia.

Ásia: 34 = Achin., Afeganistão, 35 = Kumaun, Himalaia, India, 36 = Kharidunga, Nepal, 37 = Ust Kara, Mongolia, 38 = Shandung, China e Khingan, Lioa Tung, Manchuria, 39 = Yongyang e Namgye, Coréia do Norte, 40 = Mysore, 41 = Salem, India, 42 = Bozkurt, 43 = Eskisehir, Turquia.

Austrália: 44 = Huandot, N.T., 45 = Lawlers, 46 = Bulong, 47 = Ravensthorpe, W.A., 48 = Balcanoona, 49 = Copley, 50 = Eyre Peninsula, 51 = Coorong Lagoon, S.A., 52 = Arthur e Savage River, Tasmania, 53 = Heathcote, Vic., 54 = Thuddrunga, N.S.W., 55 = Mt. Redcliffe, Qld., 56 = Nova Caledônia.

África: 57 = Beni Bousera, Marrocos, 58 = Eastern Desert, Egito, 59 = Sol Hamid, Sudão, 60 = Lake Natron, Tanzania, 61 = Mtito Andei, Kenia, 62 = Pare Mts., Tanzania, 63 = Bié, Angola, 64 = Barton Farm, Zimbabwe, 65 = Barbeton, África do Sul, 66 = J. Rokham, Arábia Saudita, 67 = Sabkhas de Abu Dhabi.

3.4 – UTILIZAÇÃO DA MAGNESITA

Segundo Queiroz (1997) a magnesita é considerada, em geral, de interesse econômico quando o teor mínimo de MgO na base calcinada atinge o patamar de 65%, além, naturalmente, de outras exigências relativas a sílica, óxido de ferro, cal e alumina, cuja soma não deve exceder, na sua totalidade, a faixa dos 2,5% a 3%. É, na sua quase totalidade, destinada à obtenção dos seguintes produtos:

- Sínter magnesiano
- Magnésia cáustica
- Magnésio metálico
- Compostos de magnésio

O sínter magnesiano, ou magnesita calcinada à morte, resulta do processo de calcinação e sinterização da magnesita, sob condições elevadas de temperatura, em geral da ordem de 1.800°C a 2.000°C. Trata-se de um produto de alta pureza, em geral acima de 90% de MgO, largamente usado na fabricação de produtos refratários básicos que são utilizados no revestimento das paredes internas e abóbadas de caldeiras, de fornos elétricos, fornos de soleira aberta, fornos rotativos, conversores a oxigênio, etc., das indústrias do aço, do cimento e do vidro.

A magnésia cáustica ou magnésia reativa assim como o sínter magnesiano, resulta do processo de calcinação da magnesita em fornos convencionais a temperaturas de 800°C a 1.000°C, com teor de MgO variando de 85% a mais de 90%. Esse derivado de magnesita tem sua maior aplicação nos seguintes campos: fabricação do cimento sorel, na agricultura como fertilizante e na agropecuária como nutriente, como absorvente e catalisador, como isolante térmico, na indústria do petróleo como agente clareante e como substituto da bentonita na lama de perfuração e na indústria do papel, na fabricação da borracha sintética, como agente vulcanizante e catalisador. Na Tabela 3-4 mostram-se, sinteticamente, as especificações dos produtos obtidos a partir da magnesita crua e suas principais aplicações.

Tabela 3-4 – Especificação do produto obtido a partir de magnesita em função de sua aplicação

Fonte: Adaptada de Queiroz (1997).

| Matéria-prima natural | Produto obtido | | | | | | Aplicação |
|--|-------------------|-------------------------------|---------------------------|---------|------------------|--------------------------------|--|
| | Por calcinação | Por calcinação e sinterização | Especificação Química (%) | | | | |
| | | | MgO | CaO | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | |
| Magnesita (em base calcinada) | Magnésia cáustica | | 87-92 | 2,0-2,5 | 1,0-4,0 | - | Indústria química, metalúrgica, cosméticos e farmacêutica, cerâmica, papel, agropecuária, etc. |
| MgO >65,0% Fe ₂ O ₃ ≤4,5% | | Sínter magnésiano | ≥94,0 | ≤0,9 | ≤1,8 | ≤2,9 | Indústria de refratários: refratários básicos, moldados e não moldados |

O magnésio metálico é outro produto da magnesita, de grande importância na obtenção de ligas aluminosas e de magnésio, com vasto campo de aplicação na indústria aeroespacial, maquinaria e ferramentas em geral.

Compostos de magnésio, como cloretos, iodetos, fosfatos, sulfatos, óxidos, carbonatos, etc., têm uma vasta linha de aplicações nas indústrias química, têxtil, cerâmica, de cosméticos, farmacêutica e metalúrgica.

3.5 – A MAGNESITA DA SERRA DAS ÉGUAS

3.5.1 – Histórico

A primeira referência sobre a localidade de Brumado, então conhecida como Bom Jesus dos Meiras, se encontra em um artigo de Dom Pedro Augusto de Saxe Cobourg Gotha, apresentado por M. Daubrée à Academia de Ciência de Paris em 1889, publicado nos “Comptes Rendus” daquela Academia. Neste artigo o autor faz o estudo cristalográfico de um magnífico cristal de hematita especular, pertencente à coleção do Museu Nacional do Rio de Janeiro.

Siedel (1914) descreve um conjunto de minerais da coleção do Museu de Mineralogia da Universidade de Marburgo, oriundos do distrito de Bom Jesus dos Meiras, estado da Bahia, Brasil. Neste trabalho o autor determina parâmetros cristalográficos dos seguintes minerais: berilo (nas variedades de água-marinha e esmeralda), topázio, rutilo, turmalina, quartzo, clinoanfíbólio (tremolita-actinolita), epídoto, zircão, magnesita e caulinita. A descrição da esmeralda constituiu algo inédito, pois até aquela data o berilo gemológico encontrado no Brasil ocorria essencialmente sob a forma de água-marinha de origem pegmatítica. O último autor conclui que o conjunto de minerais não podia pertencer a uma única paragênese. Ele afirma que os minerais topázio, berilo, turmalina, quartzo e, provavelmente, rutilo pertencem à mesma paragênese mineral, cuja origem estaria relacionada a intrusões de pegmatitos.

Arlt e Steinmetz (1915) descrevem uma coleção de minerais composta por berilo e outras fases paragenéticas oriundas do distrito de Bom Jesus dos Meiras, estado da Bahia, Brasil. Uma descrição morfológica detalhada, incluindo o cálculo de constantes cristalográficas foi realizada em amostras dos seguintes minerais: quartzo, rutilo, hematita, martita, pirita, magnesita, dolomita, xenotima, monazita, berilo, turmalina, topázio, espodumênio, granada, albita e titanita. Segundo os autores dois processos estariam relacionados à gênese das fases minerais descritas. A paragênese quartzo-monazita-turmalina-granada-espodumênio-berilo-xenotima-albita estaria relacionada a pegmatitos, a exemplo de ocorrência em Madagascar, na África. Entretanto, o estudo da tipologia dos cristais de monazita e titanita mostra, segundo os autores, que a gênese desses minerais não estaria

relacionada aos pegmatitos e sim ao preenchimento de fraturas, como descrito nos Alpes. Os cristais de monazita de pegmatitos exibem usualmente faces {100} bem desenvolvidas, o que não se verificou nas amostras oriundas de Bom Jesus dos Meiras. Nessas amostras as faces segundo {111} é que são bem desenvolvidas a exemplo do que ocorre em cristais de preenchimento dos veios alpinos. A titanita, por sua vez, constitui um mineral constantemente observado em veios alpinos e é relativamente rara em pegmatitos. Os autores interpretam a dolomita como sendo de origem magmática. A ocorrência de martita e pirita é relacionada a contribuição do embasamento cristalino.

Uhlig (1915) realiza análises químicas e determinações de parâmetros cristalográficos em amostras de um mineral que em virtude da associação com magnesita e da tipologia dos cristais era considerado como uma fase mineral nova. A determinação das constantes cristalográficas do mineral e da sua composição química permitiram ao autor concluir que se tratava de monazita. Ele não interpreta o processo genético do mineral, entretanto exclui a possibilidade da gênese estar associada a intrusões de corpos pegmatíticos. O autor compara o resultado das análises químicas da monazita de Bom Jesus dos Meiras com dados de outras ocorrências brasileiras disponíveis na literatura da época. O quimismo das monazitas de Bom Jesus dos Meiras se distingue das outras amostras pela depleção em Ce_2O_3 e enriquecimento em Y_2O_3 . O autor publica ainda os seguintes dados sobre a composição química das magnesitas : $\text{CO}_2 = 50,27$, $\text{MgO} = 46,09$, $\text{CaO} = 0,28$, $\text{FeO (Fe tot.)} = 0,67$, Elementos das Terras Raras (ETR) = 0,45, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,17$, PF = 0,06, material insolúvel em HCl = 1,78.

O primeiro trabalho sistemático sobre os depósitos de magnesita da Serra das Éguas está contido no boletim 975-C do United States Geological Survey (USGS), de autoria de Alfred J. Bodenlos, publicado em 1954. Este bem documentado trabalho traz desde a história do “achamento” dos depósitos de magnesita, a geografia do local, a geologia dos diversos jazimentos e minas, hipóteses da origem, quimismo da magnesita, até as reservas dos depósitos, além de considerações econômicas.

Do histórico artigo de Dom Pedro Augusto (1889) até a publicação do boletim do USGS, de Bodenlos, além dos três trabalhos em alemão já citados, apenas seis

outros trabalhos sobre os depósitos da Serra das Éguas foram publicados. Quatro deles são referenciados neste trabalho.

Vê-se assim que, embora bem pouco divulgadas, as ocorrências da Serra das Éguas são conhecidas desde o final do século 19, principalmente em função de uma variada gama de minerais não usuais, conforme bem descrevem Cassedane e Cassedane (1978) e Barbosa et al. (2000). Não se tinha, no entanto, noção da imensa reserva de magnesita ali à espera de descobridores.

Conforme Leonardos (1943), em 1939 Georges Louis Minviele e Miguel Pierre Cahen, interessados na produção de magnésio metal, o procuraram na Divisão de Fomento da Produção Mineral, no Rio de Janeiro, para que este lhes dissesse onde poderiam encontrar magnesita. Foram informados das ocorrências de Jequié e sobre as da Serra das Éguas, insuficientemente estudadas. Dirigindo-se estes senhores à Serra das Éguas, ali constataram não só a presença mas o grande volume de magnesita na região. De volta ao Rio, fundaram a Sociedade Magnesita Limitada, transformada, depois, em Magnesita S. A., autorizada a funcionar pelo decreto número 6220 de 4 de setembro de 1940.

Hoje a Magnesita S. A. é detentora de praticamente todos os direitos minerários na Serra das Éguas, e a maior produtora e comercializadora, no Brasil, de magnesita para diversos fins, além de talco, que também é encontrado na região.

3.5.2 – Localização

Segundo Oliveira e Fragomeni (1980), a Serra das Éguas é uma feição marcante na morfologia do centro-sul baiano, com altitudes de mais de 1000m. Possui uma extensão de aproximadamente 18km, por 10km de largura. Sua forma é grosseiramente ovalada dispendo-se seu eixo maior na direção N20°E, ocupando uma área de cerca de 142km². Situa-se no Município de Brumado, Estado da Bahia, entre as seguintes coordenadas geográficas: 14° 03' 47'' a 14° 16' 28'', latitude Sul e 41° 37' 30'' a 41° 47' 01'', longitude Oeste.

Brumado dista de Salvador cerca de 600km e o acesso a partir dessa capital é feito através de rodovias asfaltadas, sendo os primeiros 110km pela BR-324 até Feira

de Santana, daí até Vitória da Conquista, via BR-116. O restante do trajeto é feito por rodovia estadual, por 130km (GeoEstrutural, 2002), ver Figura 3-3.

O clima da região é do tipo estepe tropical, quente e seco, com chuvas de verão, tendendo a semi-árido, caracterizado notadamente pela má distribuição das chuvas no espaço e no tempo. As precipitações médias anuais estão em torno de 600mm, podendo, entretanto, não chover durante um ano todo. A vegetação é do tipo caatinga hipoxerófito, com arbustos espinhentos e árvores de pequeno porte ao longo dos leitos dos riachos, superadaptada às condições climáticas. Na Serra das Éguas desenvolve-se um microclima típico das elevações do sertão baiano. As temperaturas são mais amenas e o ar mais úmido, aparecendo uma vegetação de matas, com árvores de porte nas ravinas e de campos gerais nas superfícies mais aplainadas das maiores altitudes. Este microclima, com presença de campos, muito conveniente à criação de eqüinos e envolvendo a elevação de brumas matinais, foi o responsável pelas toponímias locais: Serra das Éguas e Brumado (Oliveira e Fragomeni, 1980).



Figura 3-3 – Mapa de localização da área de Brumado.

Fonte: Adaptado do Ministério dos Transportes (2003).

A rede de drenagem é praticamente temporária, sendo o principal curso d'água o Rio do Antônio, o qual se torna intermitente nos períodos de estiagem e sujeito a cheias repentinas na época das chuvas. Os demais riachos apresentam-se secos no decorrer do ano, com água apenas enquanto duram as chuvas, exceção feita aos poucos córregos que drenam nascentes perenes nas encostas da Serra (Oliveira e Fragomeni, 1980).

3.5.3 – Aspectos da Geologia Regional

Mascarenhas (1976), inclui as ocorrências de magnesita da Serra das Éguas dentro do contexto de um “Greenstone Belt”. Trata-se do “Greenstone Belt” de Brumado, com uma área de afloramento de cerca de 2.000km², distribuído em zonas independentes dentro do Complexo Metamórfico-Migmatítico que representa, juntamente com o Complexo Granulítico, o denominado “embasamento cristalino” na região. O mesmo autor acredita que a idade de formação das estruturas do tipo “Greenstone Belts” da Bahia deve-se situar entre 3.000 m.a. e 2.700 m.a., o que as coloca no Arqueano Médio a Superior.

Simplificadamente pode-se observar na área dois conjuntos maiores, litoestratigraficamente distintos, pertencentes ao Arqueano inferior a médio: o atual embasamento caracterizado por gnaisses e migmatitos, localmente ricos em restos paleossomáticos anfibolíticos, com quartzitos subordinados, e uma assembléia singular de rochas metamórficas, o Grupo Serra das Éguas. Este último tem três unidades bem distintas, constituídas por anfibolitos, mármore dolomíticos e actinolita-tremolita-mármore, na base; mármore magnesíticos, actinolita-mármore e rochas cálciosilicáticas, na porção intermediária e, finalmente, quartzitos, dolomita-quartzitos e quartzitos ferruginosos no topo. Esta seqüência é tipicamente de caráter vulcanogênico, havendo sido determinadas pelo menos duas fases de vulcanismo básico-ultrabásico constituintes da Unidade Inferior. A Unidade Média, na qual se encontram os depósitos de magnesita, é de natureza químico-sedimentar, podendo-se admitir uma contribuição epiclástica na Unidade Superior (Oliveira, Fragomeni e Bandeira, 1997). A Figura 3-4 ilustra esquematicamente a coluna estratigráfica simplificada do Grupo Serra das Éguas.

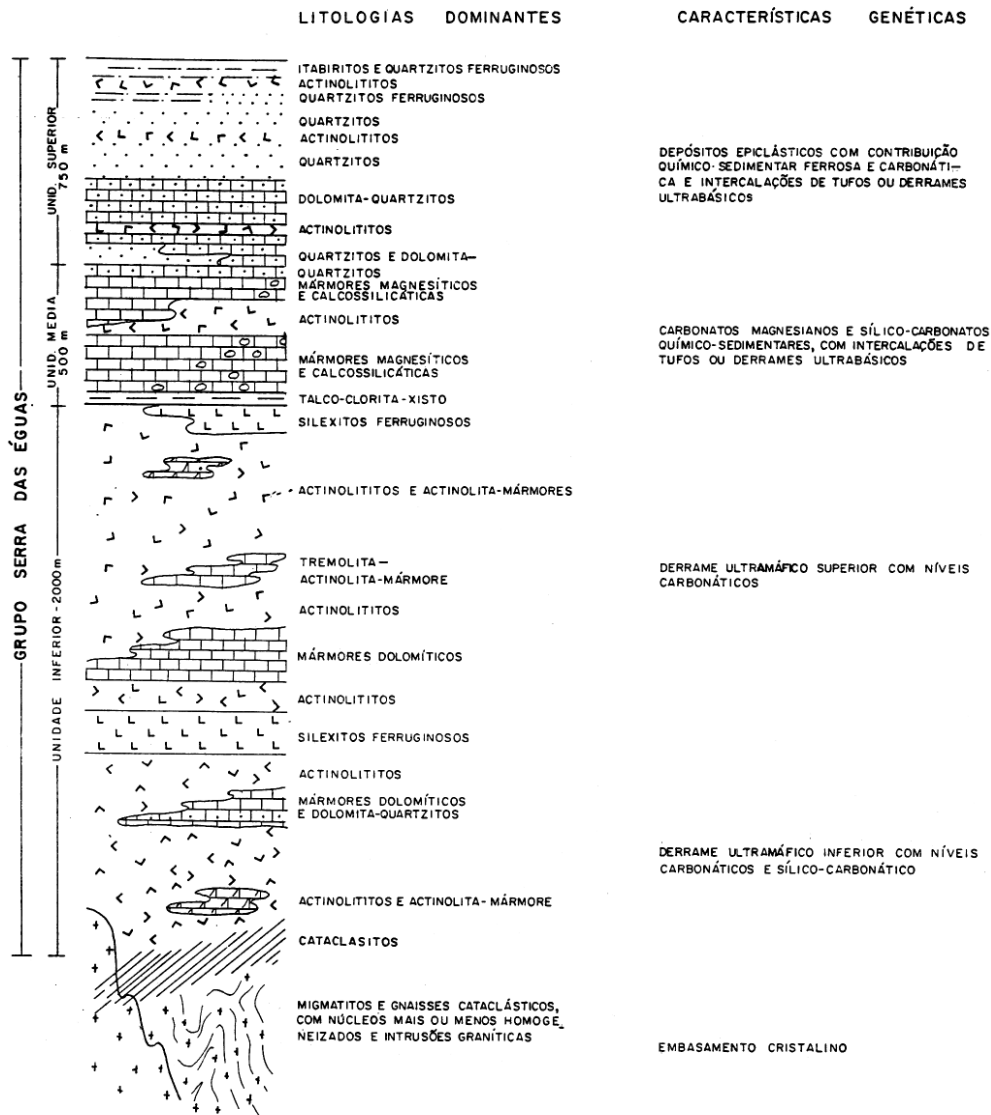


Figura 3-4 – Coluna estratigráfica simplificada do grupo Serra das Éguas.

Fonte: Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997).

3.5.4 – A gênese da magnesita

Barbosa (1943) parece ter sido o primeiro a emitir opinião sobre a gênese da magnesita da Serra das Éguas:

“Na nossa opinião o conjunto de rochas da Serra das Éguas foi inicialmente constituído de sedimentos margosos, calcáreo-dolomíticos e arenosos impuros, possivelmente intercalados com derrames de rochas básicas. No Arqueano este conjunto foi metamorfozido regionalmente; posteriormente, ações hidrotermais e pneumatolíticas, cuja origem o autor não pode pesquisar, modificaram a maior parte das massas dolomíticas

em magnesita, lixiviando a cal e produzindo ainda, em menor escala, talco, esteatito, amianto, veios de hematita, de magnesita, de quartzo, calcedônia, etc. É possível mesmo que esses fenômenos de contacto telemagmático se tenham repetido através dos tempos algonquiano e paleozóico antigos”.

Mello Júnior (1943), após Otávio Barbosa, também emitiu opinião sobre a gênese do depósito:

“A origem da magnesita é devida provavelmente à atuação, sobre rochas calcárias preexistentes, de soluções hidrotermais que acarretaram a substituição da cal pela magnésia por um processo metassomático, com a conseqüente formação de talco e demais silicatos associados”.

Järnefelt e Merz (1947) sugerem concordar com a origem sedimentar seguida de magnésio-metassomatose. Levantam a problemática da fonte para o magnésio e sugerem algumas possibilidades.

Bodenlos (1954), que estudou mais sistematicamente a magnesita da Serra da Éguas, também é favorável à origem sedimentar seguida de metassomatose. Julgando pela mineralogia, Bodenlos classifica a mineralização da Serra das Éguas como, no mínimo, mesotermal. Não arrisca a fonte magmática das soluções mineralizantes mas, como encontrou xistos parcialmente granitizados, sugere a possibilidade de um magma granítico. Sugere, ainda, que a magnesita vermelha e a magnesita branca devem representar dois eventos distintos de mineralização.

Vicente Oliveira e colaboradores (Oliveira e Fragomeni, 1980; Oliveira, Fragomeni e Bandeira, 1997), baseados em evidências tais como:

- extensão das camadas;
- possança dos pacotes de magnesita;
- continuidade da camada ao longo de toda a estrutura da Serra das Éguas;
- camadas concordantes, dispostas na base de uma seqüência dobrada;
- presença de uma seqüência de rochas químico-sedimentares (itabiritos, quartzitos e dolomitos);

parecem não ter dúvida de uma origem químico-sedimentar para a formação dos depósitos. Para isso admitem a seguinte seqüência para a formação da magnesita:

- presença original de rochas com grande conteúdo de magnésio (rochas básico-ultrabásicas – representadas hoje pela seqüência de anfibolitos que constitui a seqüência basal da Serra);
- ambiente marinho – mar interior fechado – com condições climáticas especiais termodinâmicas e termoquímicas, que propiciassem o desenvolvimento e fixação do CO₂;
- condições químico-sedimentares propícias à liberação e posterior fixação do magnésio e à formação dos carbonatos.

Ainda segundo Vicente Oliveira e colaboradores, os fatores estruturais posteriores teriam contribuído para o condicionamento geológico dos corpos de minério, assim como provocado os fenômenos de recristalização e modificação na textura e qualidade dos diferentes tipos de magnesita presentes na área.

Mais recentemente, Grubb (1981), expondo teorias e mencionando observações de campo, conclui que os depósitos de magnesita da Serra das Éguas devem ser considerados parcialmente de origem sedimentar, sendo que, durante uma fase de atividade tectônica, intenso metassomatismo de magnésia e metamorfismo de grau mais alto resultaram na formação de magnesita adicional, principalmente a partir do dolomito associado. Este mesmo autor, ainda, menciona a forte semelhança deste depósito com as ocorrências de magnesita do tipo cristalino da região leste dos Alpes.

Lima (1986), utilizando dados de estudo dos processos sedimentares e metamórficos, complementados por estudos de fracionamento isotópico de carbono e oxigênio, conclui que a magnesita de melhor qualidade da Serra das Éguas é de origem sedimentar, podendo ocorrer magnesita de origem diversa e de menor importância econômica.

Almeida (1989), estudando a magnesita de Campo de Dentro, mina próxima do conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba, também na Serra das Éguas, conclui

que os magnesititos por ele estudados são de origem sedimentar. Teriam sido formados em “bacias restritas, supra-tidais e com influência de água doce continental, por precipitação e enriquecimento em Mg^{2+} no ambiente sedimentar, por maturação do precipitado”.

Pelas similaridades que apresentam os depósitos de magnesita da Serra das Éguas com os do País Basco, os grandes depósitos da Manchuria, os dos montes Urais e os austríacos, é razoável especular-se que tenham gênese também similar. Há, no entanto, controvérsia quanto à origem destes depósitos.

3.5.5 – As minas

Os principais depósitos da Magnesita S. A., na Serra das Éguas, são:

- Conjunto Mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba
- Mina Pirajá
- Mina Pedra de Ferro-Catiboaba

Estes são os únicos depósitos conhecidos, até o momento, com minério apropriado para a fabricação de síter, baseado nas exigências mercadológicas atuais.

As demais minas, como Boa Vista, Covil das Onças, Bate-Pé, Cabeceiras, Cordeiro, etc., apresentam minério pobre, utilizado em mistura, em proporções variáveis com um dos tipos de minério das minas acima mencionadas.

A Figura 3-5 ilustra a localização das principais minas no contexto Serra das Éguas. A Figura 3-6 é a legenda para as simbologias utilizadas.

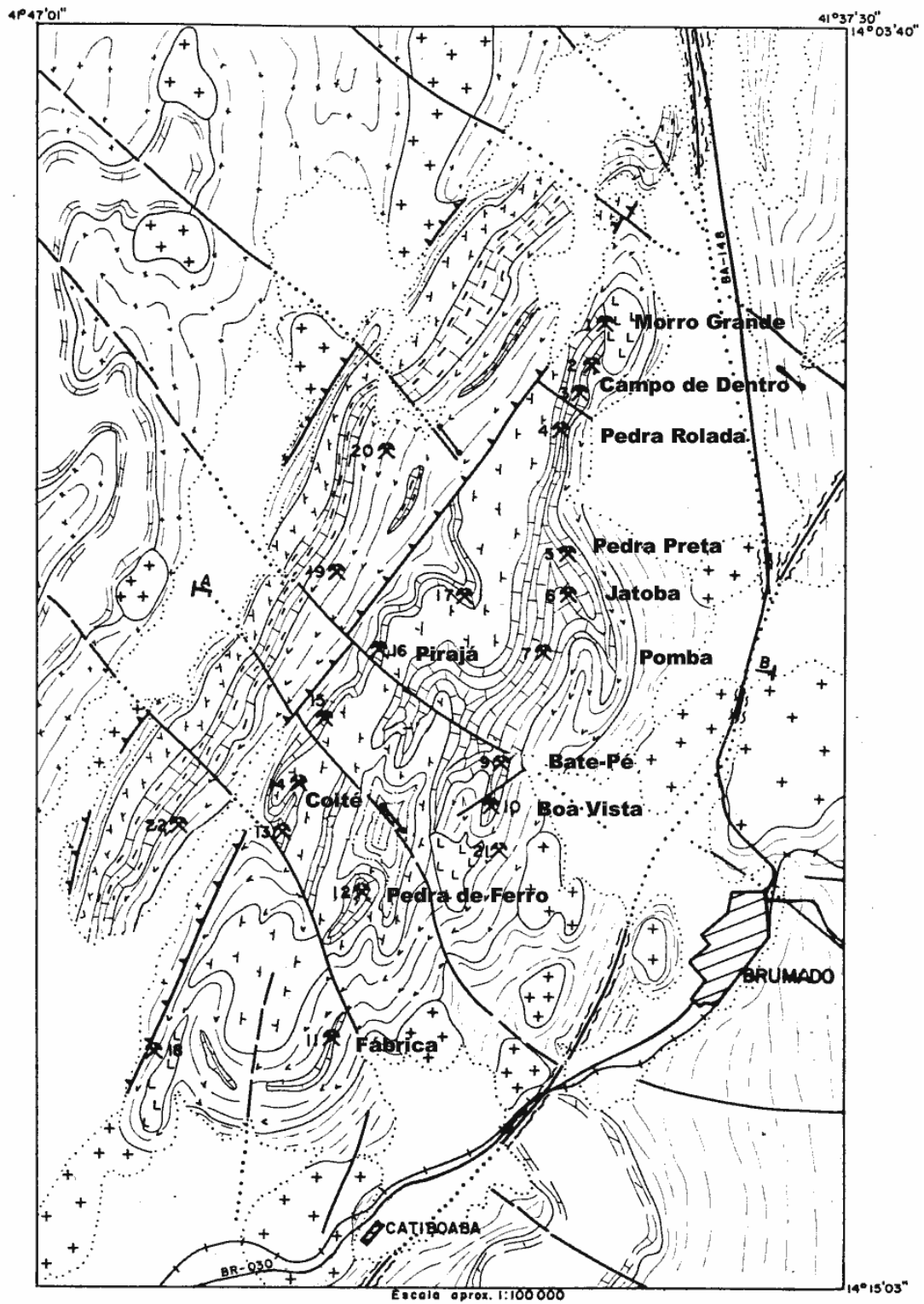


Figura 3-5 – Esboço geológico com localização do conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba.

Fonte: Adaptado de Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997).

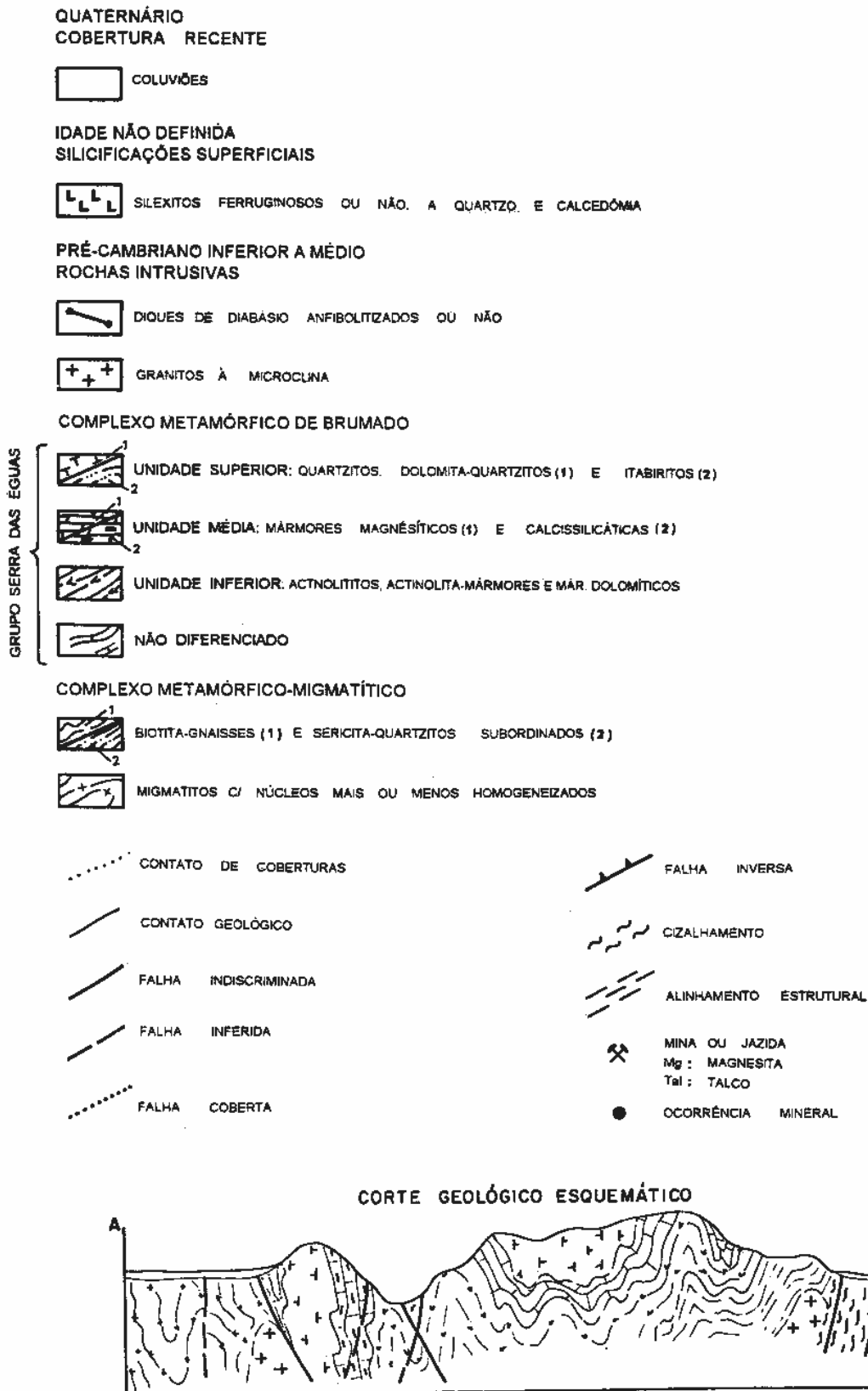


Figura 3-6 – Legenda para a Figura 3-5 e corte geológico esquemático.

Fonte: Adaptado de Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997).

3.5.6 – O conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba

Segundo Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997) o conjunto é formado por três minas que, apesar de possuírem minério com características próprias, constituem um único jazimento com 2.400m de extensão por cerca de 600m de largura, com o eixo principal na direção NE-SW (20°). No extremo nordeste do jazimento, tem-se a mina de Pedra Preta, a mais conhecida e tradicional da Serra das Éguas, mostrada em um corte geológico na Figura 3-7.

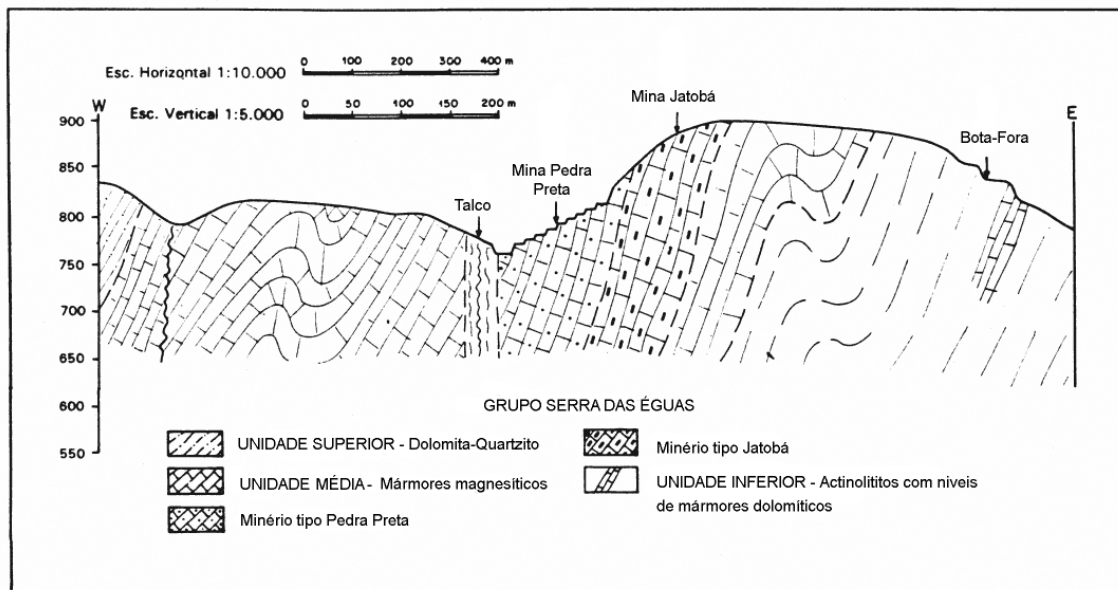


Figura 3-7 – Corte geológico esquemático da mina de Pedra Preta.

Fonte: Adaptado de Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997).

O minério é de cor avermelhada, grã grossa, apresentando nítidos sinais de recristalização. À medida que se caminha na direção SW, rumo a Jatobá, o minério sofre forte branqueamento e a granulometria se torna mais fina, culminando com o minério rosa claro de alta pureza da mina do Pomba.

Na mina de Pedra Preta, faz-se uma seleção manual que tem por objetivo eliminar o minério contaminado com ferro e talco. Para o minério de Jatobá e Pomba, a eliminação do talco é feita através de uma usina de concentração que utiliza flotação como meio de purificação.

Neste conjunto se produzem três principais tipos de minério:

- PP-01 – para a produção de sínter M-10 – Pedra Preta
- PP-02 – para a produção de sínter M-20 – Pedra Preta
- PP-03 – para a produção de sínter M-30 – Pomba e Jatobá

As principais características químicas utilizadas como indicadores tipológicos dos três minérios, bem como dos estéreis, são mostradas na **Tabela 3-5**.

Tabela 3-5 – Características químicas dos minérios e estéreis.

Fonte: GeoEstrutural (2002).

| Tipo/Elemento | SiO₂ (%) | Fe₂O₃ (%) | Al₂O₃ (%) | MnO (%) | CaO (%) | MgO (%) |
|----------------------------|-------------------------------|---|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| PP-01 | <6,0 | <4,5 | <4,0 | <1,2 | <1,0 | >85,0 |
| PP-02 | <3,0 | <3,5 | <3,0 | <1,2 | <1,0 | >90,0 |
| PP-03 | <20,0 | <7,5 | - | <3,5 | <2,0 | >60,0 |
| Estéril silicoso | >20,0 | <7,5 | - | <3,5 | <2,0 | >60,0 |
| Estéril ferruginoso | <20,0 | >7,5 | - | <3,5 | <2,0 | >60,0 |
| Estéril sílico-ferruginoso | >20,0 | >7,5 | - | <3,5 | <2,0 | >60,0 |

Considerando-se o minério bruto “in situ” do conjunto de minas, tem-se as seguintes reservas:

- Mina Pedra Preta: 35.000.000 toneladas
- Mina Jatobá: 9.500.000 toneladas
- Mina Pomba: 23.500.000 toneladas
- Total: 68.000.000 toneladas

3.5.7 – A lavra e o processamento do minério

Tal como relatam Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997), a extração do minério é feita através do método clássico de lavra a céu aberto, em bancadas múltiplas com plataformas de trabalho dimensionadas em função da produção e das características dos equipamentos. A mineração se desenvolveu segundo um planejamento global, envolvendo todo o conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba, objetivando a integração das três cavas hoje existentes, cujo resultado final será um único grande “pit”, com cerca de 2.500m de extensão. A cava final terá 256m de altura por cerca de 600m de largura.

Após desmonte, o “run-of-mine” alimenta uma estação de britagem com capacidade de 600 toneladas/hora e que fornece material em três granulometrias diferentes, que são:

Acima de 69,85mm (2 ¾in) – graúdo

Entre 69,85mm (2 ¾ in) e 28,575mm (1 ⅛ in) – cascalho

Abaixo de 28,575mm (1 ⅛ in) – fino (refugo)

A Figura 3-8 ilustra a produção do minério para o sinter M-10. Observe-se que o material fino (abaixo de 28,575mm) é descartado como refugo.

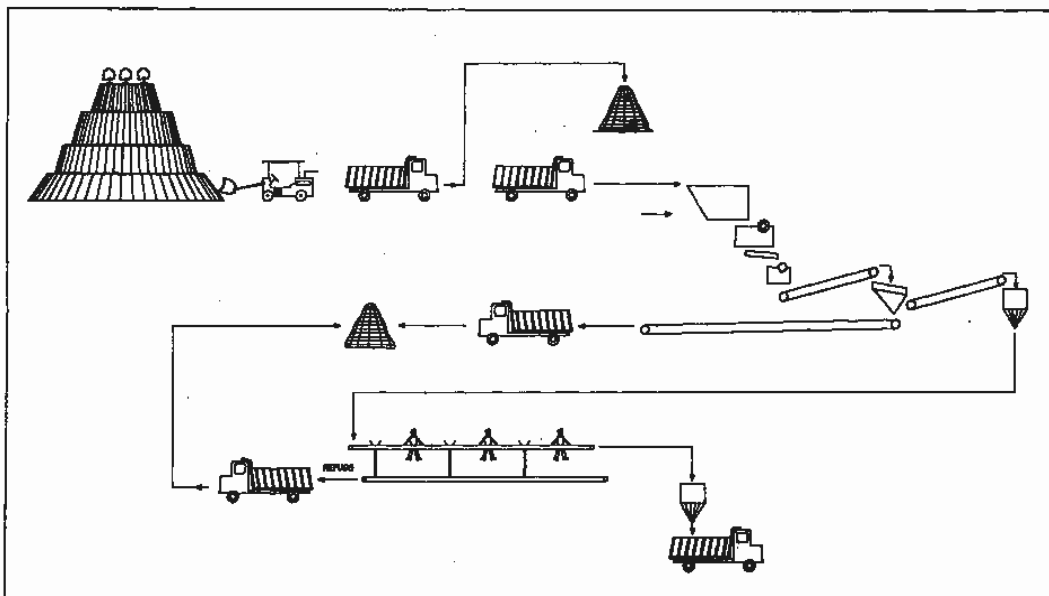


Figura 3-8 – Fluxograma da produção do minério para o sinter M-10.

Fonte: Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997).

Os minérios cascalho e graúdo, depois de passarem por uma etapa de catação manual, para a separação de fragmentos contaminados com talco e hematita, vão para uma pilha de homogeneização e daí para uma pilha “pulmão”, que alimenta diretamente os fornos verticais de sinterização de M-10 em Pedra Preta.

Na britagem para a produção de M-20, o minério é selecionado e levado para uma pilha, de onde é transportado para as instalações de Catiboaba, a uma distância de 15km. Em Catiboaba, antes de alimentar os fornos, o minério é rebitado, seguindo para uma pilha formada com material na faixa de 7,94mm (5/16in), e daí para os silos que alimentam correias que abastecem os fornos. Ver Figura 3-9.

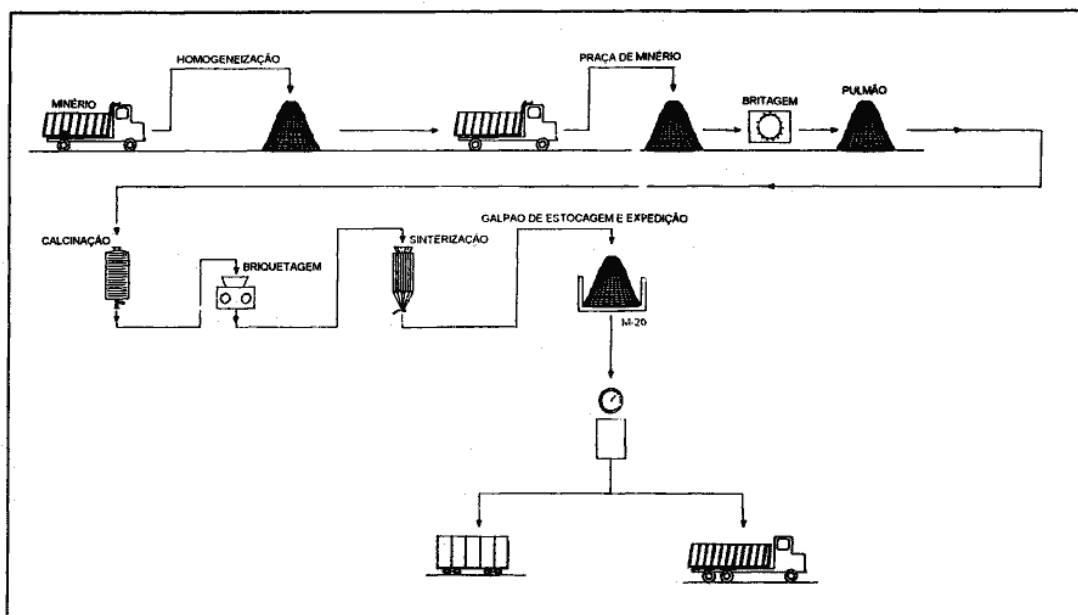


Figura 3-9 – Fluxograma da produção do minério para o sinter M-20.

Fonte: Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997).

O minério para a produção de M-30, após passar pela instalação de britagem na mina, segue por caminhões até a usina de concentração de Catiboaba. Este minério possui talco e hematita em abundância tal que o faz ficar com seus teores de sílica e ferro acima dos limites definidos para PP-01 e PP-02, mas podendo, ainda, ser utilizado para mistura e/ou tratamento seletivo (flotação). Ver Figura 3-10.

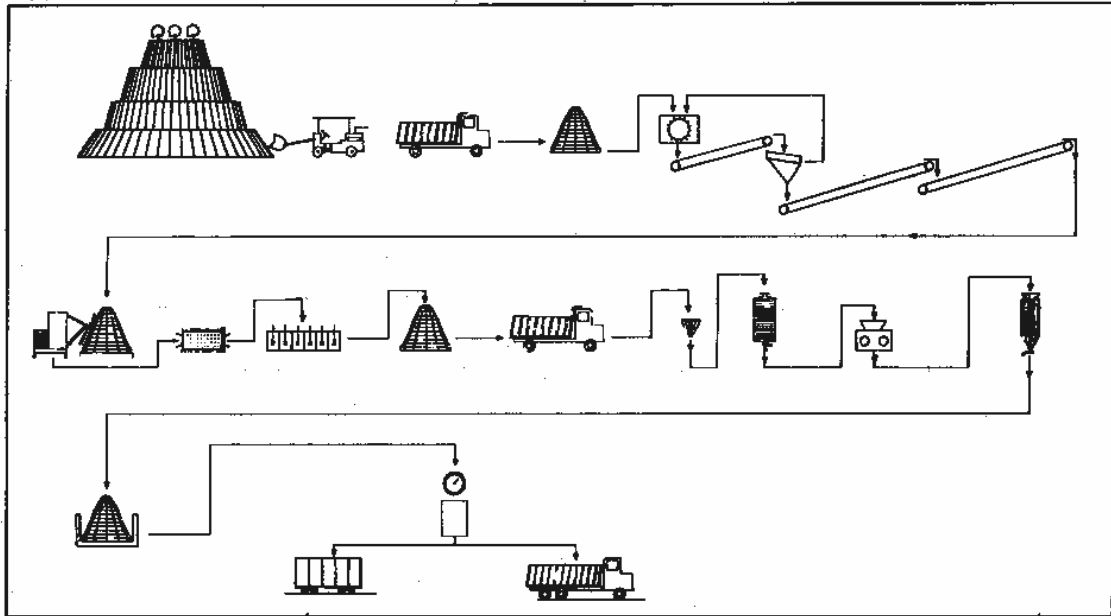
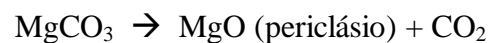


Figura 3-10 – Fluxograma da produção do minério para o sinter M-30.

Fonte: Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997).

A magnesita submetida a tratamentos térmicos entre 1800°C a 2100°C resulta no produto que se denomina comercialmente “magnesita calcinada à morte”, “dead burned magnesite” ou “sinter magnesiano”. Teoricamente a reação que ocorre nos fornos é:



O material assim obtido é isento de CO₂, não é reativo e o peso específico é bem elevado devido à densificação que ocorre durante o processo, com a eliminação do CO₂. A Tabela 3-6 mostra as características físicas e químicas dos quatro tipos de magnesita calcinada à morte produzidos pela Magnesita S. A.. As fases denominadas acessórias são M₂S (forsterita), CMS (monticellita) e MF (magnésioferrita).

Tabela 3-6 – Características típicas dos sínteres produzidos pela Magnesita S.A.

Fonte: Especificações de matéria-prima, Magnesita S.A. (1998).

| Características | Sínter | | | | | |
|---|---------------------------|-------|-----------------------|-------|--------|-------|
| | M-10 | | M-20 | | M-30 B | |
| | Esp. | Tip. | Esp. | Tip. | Esp. | Tip. |
| SiO ₂ (% ponderal) | ≤1,80 | 1,29 | ≤1,50 | 1,16 | ≤0,30 | 0,25 |
| Al ₂ O ₃ (% ponderal) | ≤0,60 | 0,35 | ≤0,50 | 0,32 | ≤0,12 | 0,05 |
| Fe ₂ O ₃ (% ponderal) | ≤2,90 | 2,11 | ≤2,50 | 1,82 | ≤0,50 | 0,41 |
| MnO (% ponderal) | ≤1,00 | 0,94 | ≤1,00 | 0,91 | ≤0,16 | 0,12 |
| CaO (% ponderal) | ≤0,70 | 0,44 | ≤0,60 | 0,43 | ≤0,90 | 0,77 |
| MgO (% ponderal) | ≥94,00 | 94,88 | ≥95,00 | 95,37 | ≥98,00 | 98,40 |
| B ₂ O ₃ (% ponderal) | - | 0,007 | - | 0,007 | - | 0,007 |
| Densidade aparente (g/cm ³) | ≥2,98 | 3,06 | ≥3,24 | 3,30 | ≥3,30 | 3,34 |
| Porosidade aparente (%) | ≤15,0 | 11,9 | ≤7,0 | 3,3 | ≤3,0 | 1,7 |
| Tamanho médio do cristal de MgO (μm) | - | 70,0 | - | 80,0 | ≥100,0 | 120,0 |
| Fases acessórias | M ₂ S, CMS, MF | | M ₂ S, CMS | | - | |

Esp. = Especificação; Tip. = Valor Típico.

3.5.8 – O fenômeno da decrepitação

Os minérios do Conjunto Mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba, com pequeno teor de impurezas (cálcio, silício e alumínio), são potencialmente adequados para a produção magnésia cáustica e/ou sínter de MgO, através da monoqueima. Trata-se de um processo em que a magnesita é calcinada a aproximadamente 1800°C, em um forno de carregamento vertical, num processo contínuo.

Um fenômeno interessante que pode acontecer com determinadas amostras quando submetidas à monoqueima é a decrepitação: por razões ainda não completamente compreendidas, o minério, carregado sob a forma de “lumps” com tamanhos entre 69,85mm (2 ¾ in) e 28,575mm (1 ⅛ in), pode-se desagregar parcial ou totalmente durante a queima. Quando a desagregação é total, o material se reduz a uma granulometria de areia grossa a fina, dificultando a permeabilidade da carga aos gases circulantes, o que prejudica o processo. A esta desagregação se denomina decrepitação.

Os operadores do processo de monoqueima têm um conhecimento empírico dos minérios com possibilidade de decrepitar e evitam sua utilização. Para esses operadores todos os tipos de minério, independentemente de sua natureza, decrepitam em maior ou menor grau, embora os minérios definidos como de grã fina sejam tidos como os mais prováveis vilões (informação pessoal).

Segundo Roedder (1984), a decrepitação, por definição, envolve rachadura ou fragmentação da amostra, sendo muitas decrepitações verdadeiramente explosivas. A violenta decrepitação de muitos minerais quando aquecidos é devida, em grande parte, à explosão de inclusões fluidas. Ainda segundo Roedder (1984), a decrepitação pode resultar de uma variedade de fatores, tais como o acúmulo de stress interno em um único grão entre dois minerais que tenham diferentes razões de expansão térmica. Mais comumente, no entanto, é o resultado da pressão interna em inclusões fluidas excedendo a resistência mecânica do frágil mineral hospedeiro, para uma dada temperatura, causando sua ruptura.

Um aspecto que deve ser levado em alta conta é o fato de que na calcinação ocorre a dissociação do carbonato, com liberação de CO_2 , sob a forma de gás, e formação de MgO . Como a magnesita é constituída por cerca de 50% de CO_2 , a perda deste, na dissociação, provoca uma substancial perda de massa, ao mesmo tempo que se tem a modificação estrutural da fase carbonatada para a fase oxidada. Esse processo propicia, assim, condições de degradação. No entanto, o processo de calcinação é, também, o principal agente da sinterização (Litai e Xianqiu, 1988). Furman et al. (1995), estudando a sinterabilidade da dolomita, verificaram que esta é controlada pela estequiometria da dolomita, elementos traços, porosidade, tamanho de cristal, textura dos cristais e estruturas de microdeformação. É possível se esperar que no caso da magnesita tais fatores também tenham relevância.

Sheila (1993), mencionando Cremer e Gatt (1949), informa que cálculos teóricos, usando uma equação tipo Clausius-Clapeyron, indicam a temperatura de 623°K, para $P_{\text{CO}_2} = 1\text{atm}$, como a temperatura de decomposição das magnesitas. Stone (1954), usando um gradiente de pressões de CO_2 de $1,315 \times 10^{-5}\text{atm}$ até 6atm, determinou que o pico endotérmico começou a aproximadamente 623°K para a menor pressão, 773°K para 1atm e 885°K para 65,8atm. De acordo com Kubas et

al. (1967), *apud* Sheila (1993), a calcinação em ar começa em 723°K e se completa a 953°K.

3.6 – TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

A mineralogia de processo, mineralogia metalúrgica ou, ainda, caracterização mineralógica / tecnológica é um ramo especializado da mineralogia aplicada, no qual se faz o estudo de aspectos específicos da mineralogia de minérios e de produtos de beneficiamento. É usada para prover aos técnicos, que utilizam matérias-primas, de informação valiosa no desenvolvimento e otimização de um processo ou tratamento metalúrgico. Idealmente, deveria haver uma quase cumplicidade entre o metalurgista e o mineralogista, de maneira que aquele pudesse melhorar sua compreensão do minério através do exame de secções polidas, montagens de grãos, etc., guiado pelo mineralogista. Da mesma forma, o mineralogista poderia melhorar sua compreensão dos problemas de tratamento e dos processos de beneficiamento guiado pelo metalurgista. Comumente, no entanto, tal situação não ocorre, e o mais freqüente é o metalurgista enviar suas amostras para um laboratório central, e receber de volta um relatório do mineralogista de plantão (Henley, 1983).

Estudos mineralógicos, se apropriadamente conduzidos e combinados com testes, são um eficiente meio de melhorar recuperações, através do entendimento de perdas devidas à utilização de técnicas inapropriadas de separação. Assim sendo, essa informação é o primeiro passo no desenvolvimento de técnicas de recuperação para aqueles minérios que, testados sem acompanhamento de um mineralogista, não produziram bons resultados (Gasparrini, 1983).

Embora tenha-se observado nas últimas décadas intensa sofisticação em termos de técnicas analíticas, pode-se afirmar que uma caracterização mineralógica, para fins de beneficiamento de minério, ainda hoje é fundamentada na microscopia óptica. Nenhuma outra técnica fornece tanta informação com a mesma relação custo-benefício. A análise de imagens, aliada à microscopia óptica e à microscopia eletrônica de varredura (juntamente com o concurso da moderna computação) veio "dar um descanso" ao mineralogista, permitindo a aquisição

automática de um volume muito maior de dados em menor tempo. Técnicas auxiliares, mas não menos importantes são a difratometria de raios-X, a microanálise eletrônica e as análises termogravimétricas.

3.6.1 – Microscopia óptica (MO)

Esta técnica é extremamente útil para o estudo de problemas de beneficiamento, pois permite não só a identificação rápida dos constituintes de um minério, bem como dos parâmetros texturais, tais como abundância dos minerais, tamanhos, liberação, forma, associações, etc. (Hagni, 1978). Estimativas semiquantitativas dos parâmetros mencionados podem ser obtidas através de vários procedimentos de contagem (Hutchison, 1974).

A luz polarizada, ao atravessar uma lâmina delgada de um mineral transparente, ou ao ser refletida por um mineral opaco, sofre mudança no seu plano de vibração. Assim sendo, a observação das propriedades ópticas, apresentadas pelos minerais quando observados em luz polarizada, dá informações que permitem a sua identificação. As propriedades características dos minerais transparentes para a espessura padrão de 30 μm são tabuladas, podendo ser consultadas em literatura clássica (Kerr, 1959; Deer, Howie e Zussman, 1975). Os minerais opacos, da mesma forma, possuem suas características e propriedades sob luz polarizada refletida tabuladas (Uytenbogaardt e Burke, 1985; Ramdohr, 1969), o que permite a um operador qualificado a identificação das fases sob estudo.

A microscopia óptica, no entanto, tem como principal limitação a resolução. Por utilizar o espectro visível, uma objetiva com abertura numérica 1,40 teria a resolução teórica de 0,18 μm (Kerr, 1959). Considera-se, no entanto, como prática, 1 μm como limite de resolução para um microscópio óptico. Assim sendo, à medida que as partículas ficam menores, é cada vez mais difícil a observação/determinação de suas propriedades ópticas. Partículas com tamanho da ordem de 37 μm (400 mesh Tyler) já têm sua identificação por microscopia óptica dificultada.

Outra limitação importante é a pequena profundidade de foco disponível na microscopia óptica, fator que não é determinante no caso de preparações planas e que veio a ser superado pela utilização da microscopia eletrônica de varredura.

A microscopia óptica, apesar dos problemas inerentes e de ser uma técnica laboriosa, influenciada pelo operador e, em grande escala, de aspecto qualitativo, permanece como o principal método para a descrição qualitativa de rochas e produtos de processo.

3.6.2 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura se baseia em um feixe de elétrons, com um diâmetro final da ordem de 0,2 a 1 μ m, condensado e focalizado sobre a superfície da amostra por um sistema elétron-óptico, que efetua a varredura de um campo da amostra sob observação. Da interação deste feixe com a amostra, são produzidos elétrons secundários, elétrons retroespalhados e raios-X característicos dos elementos que constituem a amostra (Reed, 1997).

Essa técnica supre as deficiências da microscopia óptica em termos de resolução e principalmente, em termos de profundidade de foco. Utilizando elétrons para “iluminar” a amostra, a resolução desta técnica é da ordem de 5nm ou melhor. A profundidade de foco permite a observação de aspectos tridimensionais em grande ampliação, o que é impossível em microscopia óptica.

As imagens formadas a partir de elétrons retroespalhados permitem a distinção de fases com diferentes números atômicos médios, sendo especialmente interessantes para mostrar aspectos como zoneamento químico.

Outra facilidade extremamente interessante é a possibilidade de reconhecimento da composição química das fases sob observação, com a utilização de um “espectrômetro” de dispersão de energia (EDS), além de se poder fazer mapeamentos químicos a partir da varredura de um campo sob análise.

Um ponto fraco nessa técnica é que fases diferentes, porém com número atômico similar, bem como fases polimorfas, não podem ser distinguidas, por apresentarem o mesmo nível de sinal.

3.6.3 – Catodoluminescência (CL)

Segundo Yacobi e Holt (1990), catodoluminescência (CL) é a emissão de luz como resultado do bombardeamento por elétrons de uma determinada fase. A técnica utiliza a detecção de radiação eletromagnética de um material bombardeado por elétrons, tal como na microanálise eletrônica. O sinal de CL é formado detectando-se fótons com energia ou comprimento de onda correspondente ao das regiões ultravioleta, visível e infravermelho próximo, do espectro eletromagnético. Esses fótons são emitidos como resultado de transições eletrônicas entre as bandas de condução e de valência e níveis situados no intervalo entre as duas bandas (a chamada banda proibida) de elementos de transição contidos no material analisado. Os sinais úteis nesses casos são devidos a transições que envolvem impurezas e uma variedade de defeitos.

A microscopia por CL pode ser utilizada para determinar a localização e a distribuição de impurezas em minerais, para observar texturas que não podem ser reconhecidas somente com o microscópio óptico, e também para detectar e identificar minerais, suas fases, e a distribuição das fases presentes (Yacobi e Holt, 1990).

Muitos carbonatos, quando ativados, podem exibir intensa catodoluminescência. Em muitas instâncias a CL é atribuída à presença de Mn^{2+} como íon ativador. Por sua vez o Fe^{2+} é o íon inibidor. A CL dos carbonatos tem cor variável entre o verde e o vermelho (Marshall, 1988).

Desta forma, utilizando-se essa propriedade é possível estudar, ou verificar, diferentes gerações de um determinado mineral em uma mesma rocha, desde que tenha havido diferenciação dos fluidos geradores, uma vez que as possíveis diferentes gerações podem apresentar diferentes luminescências, revelando, assim, as possíveis diversas etapas de mineralização e, desta forma, ajudando a elucidar a história da formação da rocha sob estudo.

Esta técnica pode ser utilizada tanto em um microscópio eletrônico de varredura como em um microscópio óptico. Exemplos da aplicação desta técnica ao estudo de rochas sedimentares são mostrados por Gomes (1991).

3.6.4 – Inclusões fluidas

Segundo Roedder (1984), “com exceção dos cristais que cresceram no estado sólido, todos os cristais em todas as amostras terrestres e extraterrestres se formaram a partir de algum tipo de fluido. Novos cristais em muitas rochas sedimentares e algumas rochas metamórficas, em quase todos os depósitos de minérios, formaram-se a partir de um fluido aquoso contendo vários solutos. Durante os processos de crescimento dos cristais, pequenas quantidades do meio fluido circundante são aprisionadas no cristal hospedeiro como inclusões fluidas.”

Utilizando-se como ferramenta uma platina de aquecimento e resfriamento, montada em um microscópio óptico, pode-se medir a temperatura de transição de fases em inclusões fluidas individuais. As composições e densidades dessas inclusões podem ser determinadas a partir desses dados de temperatura. Como o fluido foi aprisionado durante a formação do mineral hospedeiro, sua composição e densidade podem ser utilizadas na interpretação da história da rocha contendo a inclusão. A técnica para medição das temperaturas de transição de fases é chamada de microtermometria (Hollister, 1981).

Pelo simples procedimento de esmagar um mineral imerso em um óleo, entre duas placas de vidro, sobre a platina de um microscópio, a presença de gás sob pressão, mesmo em inclusões muito pequenas, pode ser detectada pela súbita expansão do gás liberado na abertura da inclusão, com a formação de bolhas no óleo. Este é o princípio da platina de esmagamento, conforme descrito por Roedder (1984).

Conforme lembra Leroy (1979), a pressão no interior de uma inclusão aumenta com a temperatura. Quando essa pressão excede a resistência das paredes da inclusão ela decrepita. Em experiências com cristais de quartzo sintético, Leroy (1979) menciona que para inclusões com tamanho superior a $35\mu\text{m}$, a pressão de decrepitação é de $850 \pm 50\text{bar}$. Para inclusões menores, da ordem de $12\text{-}13\mu\text{m}$, a pressão aumenta a cerca de 1.200bar . Para as inclusões menores ainda, as pressões podem atingir $2,7\text{kbar}$. No entanto, mesmo com pressões com tal ordem de grandeza, essas inclusões pequenas não decrepitaram, tendo sido observado apenas uma dissolução das paredes da inclusão, o que pode ter causado alívio da pressão. No entanto, em se tratando de minerais com boa clivagem e menor resistência, como é o caso de carbonatos, mesmo em inclusões muito pequenas, é

possível que o efeito da pressão desenvolvida possa causar danos mais significativos, como desagregação ou pelo menos micro-fissuras.

De acordo com Morteani (1989), estudos de inclusões fluidas em magnesita são surpreendentemente raros quando se considera o grande volume de literatura sobre a geologia, mineralogia e química de depósitos de magnesita. Baseado em sua experiência e em dados publicados, Morteani acha que essa escassez é provavelmente devida ao fato de que as inclusões fluidas em magnesita são muito pequenas (da ordem de $10\mu\text{m}$) e por serem, de modo geral, de natureza secundária.

3.6.5 – Microanálise eletrônica

A microanálise eletrônica, da mesma forma que a microscopia eletrônica de varredura, utiliza um feixe de elétrons para excitar um volume muito pequeno de uma amostra a emitir fótons de raios-X, que são característicos para os elementos que constituem a amostra na área de impacto. Como a intensidade dos raios-X gerados é função da concentração dos elementos presentes, por comparação com padrões, é possível quantificar-se a composição química da fase sob análise. A detecção e análise dos raios-X gerados são feitas através de espectrômetros de dispersão de comprimento de onda (WDS) e também por um espectrômetro baseado em um detector de estado sólido (normalmente SiLi), capaz de detectar e analisar raios-X por dispersão de energia (EDS). O sistema WDS apresenta melhor resolução e limites de detectabilidade superiores aos obtidos através do sistema EDS. Ambos podem detectar elementos de número atômico 5 (boro) para cima (Smith, 1976; Gomes, 1984; Reed, 1997; Garcia, 2001).

Esta técnica permite analisar partículas com diâmetro acima de $5\text{-}10\mu\text{m}$. Quando se trata de fases de diâmetro menor, o feixe excita também as fases vizinhas, fornecendo assim uma informação que não representa apenas a fase sob análise.

O fato de se utilizar um feixe de elétrons para a excitação da amostra produz um ruído de fundo elevado. Esse ruído impede a detecção de pequenas concentrações de um elemento qualquer. Para muitos métodos analíticos que envolvem contagem (entre eles a microanálise), o limite inferior de detecção é governado

pelo tempo de contagem. Este, por sua vez, depende da estabilidade do equipamento a longo termo. O limite de detectabilidade é baseado na consideração do menor tamanho de pico que pode, estatisticamente, ser distinguido acima do “background”. De modo geral, em condições de rotina instrumental para a análise de silicatos (15kV, 15nA, 10 segundos), pode-se considerar, como típico limite de detectabilidade, algo da ordem de 500ppm.

Uma sistemática para determinações da química mineral por microanálise eletrônica, com a pesquisa de elementos traços é indicada por Ramsden e French, 1990.

Deve-se lembrar a necessidade de recobrimento das preparações a serem trabalhadas na microssonda, com o objetivo de se prover um caminho de escoamento dos elétrons que incidem na amostra, bem como dissipar o calor gerado no impacto. Este recobrimento (também chamado metalização) é feito pela deposição de uma película de material condutor (por exemplo, o carbono) com espessura da ordem de 20 a 30nm (200 a 300Å). Possíveis perdas, devido à absorção pela camada de carbono, de intensidade dos raios-X gerados na amostra, ocorrem tanto na amostra como nos padrões utilizados. Uma vez que a espessura de metalização seja a mesma na amostra e nos padrões, o efeito pode ser negligenciado. O controle da espessura é feito por inspeção visual da variação da cor de uma placa de latão metalizada juntamente com as amostras (Kerrick, Eminhizer e Villaume, 1973).

3.6.6 – Difractometria de raios-X (DRX)

Quando um material é submetido à radiação X, uma parte da radiação incidente é espalhada pelos átomos que constituem o material. Os fótons espalhados pelos átomos individuais se superpõem e geralmente se cancelam. No entanto, quando os átomos têm uma estrutura ordenada, como em uma estrutura cristalina, os fótons espalhados em certas direções podem ser amplificados pela somatória de suas frentes de onda e diz-se, então, que a radiação foi difratada. Matematicamente, esse efeito pode ser descrito como uma "reflexão" de um raio-X de comprimento de onda λ incidindo segundo um ângulo θ , em um conjunto de

planos reticulares separados por um espaçamento d , se a chamada equação de Bragg, $n\lambda=2d\sin\theta$, for atendida (Reynolds, 1989).

Em um difratômetro padrão, a radiação difratada é registrada como uma função do ângulo de difração 2θ e um valor d calculado para cada reflexão através da equação de Bragg.

Em uma substância cristalina, os raios-X difratados pelos átomos que a constituem dão informação sobre a estrutura interna desse material. Os difratogramas são característicos e podem, na maioria dos casos inequivocamente, identificar a substância sob estudo.

O “International Center for Diffraction Data” (ICDD) mantém tabuladas as características de fases cristalinas (aproximadamente 108 mil em 2001), das quais cerca de 10% são minerais. Programas de computador facilitam a leitura e identificação de difratogramas, através de consultas à base de dados do ICDD.

Além de permitir a identificação de fases, o método permite, também, a determinação de parâmetros da estrutura cristalina, bem como medidas de tensão residual, textura e tamanho de cristalitos (Klug e Alexander, 1967).

Determinações quantitativas das concentrações das fases presentes em uma mistura são possíveis em determinados casos mais simples, com a utilização de padrões internos (fluorita ou coríndon), ou com a utilização de métodos semi-empíricos (Formoso, 1984).

Mais recentemente, com a facilidade introduzida pelos microcomputadores, é possível a utilização de complexos cálculos matemáticos que permitem, através de algoritmos iterativos, revelar aspectos particulares da estrutura cristalina de fases sob estudo, tal como deformações, por exemplo. Um desses métodos, já bastante popular, é o Refinamento de Estruturas de Rietveld (Snyder e Bish, 1989; Post e Bish, 1989).

A técnica de DRX pressupõe que o material analisado seja cristalino; fases amorfas não serão detectadas por não fornecerem diagramas com raias bem individualizadas acima do “background”. As fases de baixa cristalinidade poderão

ser mascaradas ou mesmo dificultar a identificação dos outros constituintes da amostra, por aumento o ruído de fundo. Outro aspecto a ser considerado é a menor concentração detectável em uma mistura. Esse limite é variável, dependendo dos coeficientes de absorção de massa dos constituintes individuais e da matriz como um todo. De modo geral considera-se como limite prático, concentrações da ordem de 2 a 3% da fase cristalina.

3.6.7 – Análises Térmicas

Segundo Skoog e Leary (1992), uma definição geralmente aceita de análises térmicas é: “Um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física de uma substância e/ou de seus produtos de reação é medida em função da temperatura enquanto a substância é submetida a um programa de temperatura controlada”. Esses métodos têm uso bastante amplo tanto em controle de qualidade como em pesquisa de produtos industriais como polímeros, materiais farmacêuticos, minerais, metais e ligas. Incluem a TGA (Thermogravimetric analysis ou análise termogravimétrica), a DTGA (Differential thermogravimetric analysis ou análise termogravimétrica diferencial), a DTA (Differential thermal analysis ou análise termodiferencial) e a DDTA (Derivative differential thermal analysis ou análise termodiferencial derivada).

Em uma análise termogravimétrica (TGA) a massa de uma amostra, em uma atmosfera controlada ou não, é registrada continuamente como uma função de temperatura ou tempo, quando a temperatura da amostra é aumentada (usualmente linearmente com o tempo). O gráfico da massa ou da percentagem em massa como função do tempo é chamado de termograma ou curva de decomposição termal. A termogravimetria fornece dados sobre a decomposição térmica, reações de oxidação, vaporização, sublimação e dessorção de uma amostra (Skoog e Leary, 1992). Na análise termogravimétrica diferencial (DTGA) aquece-se, simultaneamente com a amostra, um material inerte, normalmente Al_2O_3 calcinado, usando-o como referencial.

De acordo com o “Composite Materials Glossary” (Lee, S., [s.d.]), a análise termodiferencial (DTA) é um método analítico no qual a amostra e um material de

referência inerte são aquecidos simultaneamente a uma taxa linear, cada qual tendo seus sensores de temperatura e registradores. As mudanças de energia termal, tanto endotérmicas como exotérmicas, as quais ocorrem durante o aquecimento, são registradas graficamente. Este termograma fornece dados sobre as transformações químicas e físicas que ocorreram, tais como fusão, sublimação, transições cristalinas ou vítreas e cristalização. Já a análise termodiferencial derivativa (DDTA) é uma técnica para a determinação precisa de mudanças de temperatura sutis em termogramas, tomando-se a primeira derivada da curva de análise termodiferencial.

Na dissociação de carbonatos, considerável calor é absorvido, produzindo excelentes curvas termodiferenciais que permitem a estimativa, mesmo de quantidades muito pequenas de material. Há, no entanto, numerosas interferências que podem causar variabilidade, tais como o tamanho das partículas do material, fenômenos de oxidação de ferro e manganês, a pressão do dióxido de carbono, etc. (McLaughlin, 1967). O aumento da pressão do dióxido de carbono aumenta a temperatura de dissociação da magnesita (Stone, 1954).

Magnesita se decompõe a uma temperatura entre 660 e 690°C, inferior à temperatura de decomposição da calcita, que se dá entre 860 e 1.010°C. Para a dolomita a temperatura de decomposição do componente com magnésio é mais alta do que a da magnesita pura, ocorrendo cerca de 790°C (McLaughlin, 1967).

A ocorrência de fenômenos de substituição pode ser observada e até estimada através de análises termodiferenciais (Kulp, Kent e Kerr, 1951).

3.6.8 – Preparação de amostras

A confecção das preparações, para as técnicas analíticas antes referidas, reveste-se de tal importância que, relegada a segundo plano, causaria prejuízo certo e irreparável aos resultados finais.

O fator de maior peso é a representatividade da alíquota a ser preparada. Assim sendo, todo cuidado deve ser tomado no sentido de garantir que o analito represente, tanto quanto possível, a amostra primária.

As preparações utilizadas pelas microscopias, óptica e eletrônica, e pela microanálise são as mesmas: lâminas delgadas polidas e secções polidas. As secções polidas têm a vantagem de uma maior qualidade de polimento, sendo as mais adequadas para o estudo de minerais opacos. As lâminas delgadas polidas, embora não atinjam a qualidade de polimento das secções polidas, permitem o estudo tanto de minerais opacos quanto de transparentes, com a vantagem de se poderem analisar os aspectos texturais de ambos os grupos em uma mesma preparação. As preparações para estudo de inclusões fluidas são plaquetas da amostra, com espessura da ordem de 0,2mm, com polimento em ambas as faces, a fim de minimizar os efeitos da reflexão total nos contornos das inclusões fluidas e da dispersão da luz (Fuzikawa, 1985).

Métodos usuais de embutimento, nivelamento, desbaste e polimento, tanto de secções como de lâminas delgadas polidas (Hutchison, 1974; Craig e Vaughn, 1994; Taylor e Radtke, 1965; Allman e Lawrence, 1972) devem ser utilizados para garantir a boa qualidade necessária ao trabalho de pesquisa.

Bish e Reynolds, 1989, dão detalhes operacionais de preparação de amostras para estudos difratométricos.

3.7 – CALCINAÇÃO E SINTERIZAÇÃO

Diversos autores se dedicaram a estudos de calcinação e sinterização de compostos de magnésio. Um sumário dos principais pontos é feito a seguir.

Eubank (1951) estabelece que a calcinação de compostos de magnésio (magnesita, carbonato básico e hidróxido de magnésio) ocorre em dois estágios distintos: (1) perda de gases a temperaturas de 300 a 500°C e (2) recristalização ou sinterização a temperaturas acima de 900°C. Nas temperaturas de calcinação mais baixas a perda de gases deixa uma estrutura porosa com uma grande superfície específica e grande reatividade (poder de adsorção). Quando a temperatura de calcinação excede 900°C se inicia a sinterização, com aumento da densidade e diminuição da porosidade. Na temperatura de 1200°C observam-se, através de microscopia eletrônica de transmissão, cristais cúbicos de MgO, bem formados, com tamanho entre 0,1 e 0,2 μm .

Pande e Singh (1958), estudando compostos puros e amostras de magnesita natural, verificaram que entre 400° e 600°C ocorre a quebra da rede do MgCO_3 , com a formação de partículas extremamente pequenas de MgO (200 a 300 unidades atômicas ou algo da ordem de 30 Å), com a liberação de CO_2 . Entre 600° e 800°C a porosidade das partículas principais aumenta e as pequenas partículas de MgO se agregam em partículas secundárias maiores. Entre 800° e 950°C a porosidade descrece e a 950°C já observam-se sinais bem definidos de sinterização. A sinterização é completa a 1050°C, com a formação de cristais cúbicos bem definidos. Em magnesitas naturais (diferentemente do que acontece com o material puro) a decomposição se iniciou em temperaturas mais altas e a recristalização foi atrasada, isto é, cristais bem definidos não foram observados antes de 1000°C. A Figura 3-11 ilustra a seqüência de nucleação dos cristalitos de MgO sugerida por Pande e Singh (1958).

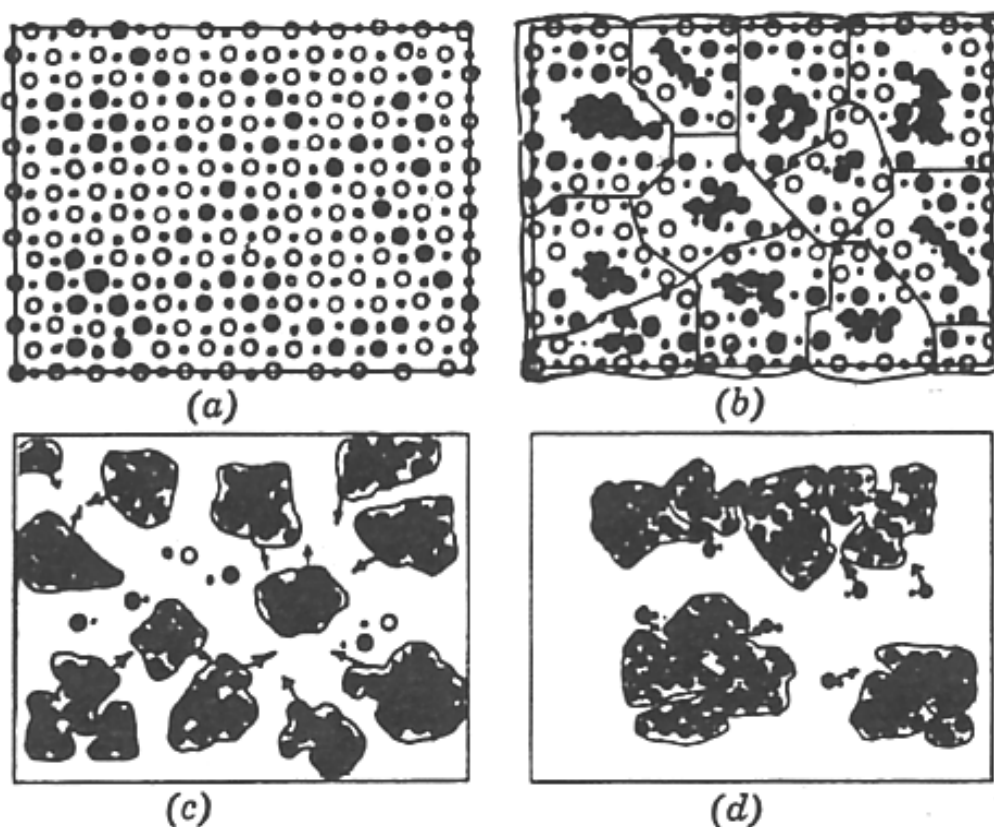


Figura 3-11 – A nucleação dos cristalitos de MgO na queima da magnesita.

Fonte: Boynton (1967)

Eubank (1951) sugere que impurezas como Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 promovem o processo de sinterização. Nelson e Cutler (1958), Kriek, Ford e White (1959), Layden e McQuarrie (1959) e Treffner (1964), estudando os efeitos de impurezas ou adições na sinterização do MgO , concluem que a presença de Fe^{+3} , Al, Mn, Si e Ti, dentro de certas concentrações, favorecem a sinterização. Os mencionados autores explicam que estes elementos criariam defeitos (vacâncias) na estrutura do MgO , o que facilitaria a migração e, portanto, promoveria a densificação do material em temperaturas mais baixas. Enquanto TiO_2 é considerado o mais efetivo promotor da sinterização, além de facilitar o crescimento dos cristais de periclásio, a presença de CaO é dada como inibidora para a sinterização do MgO .

Spencer (1972) estudou o efeito de impurezas de óxidos hexavalentes como Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , B_2O_3 , sobre o módulo de resistência à ruptura do grão de magnésia a 1500 e 1600°C, concluindo que todos, sem exceção, deterioram a resistência da magnésia “contaminada”. Dos elementos mencionados, Fe é o que menos afeta o parâmetro enquanto B é o mais deletério.

Duarte (1982) estudou a influência do óxido de manganês na sinterização de uma amostra de magnesita de Brumado. Trabalhou com uma amostra de minério considerado muito puro. Fez a adição de manganês sob a forma de MnCO_3 , variando o teor deste elemento na amostra de 0,16 até 2,5% em peso. Concluiu que o manganês favorece tanto a sinterização como a densificação do MgO , possivelmente por um efeito de aumento de concentração de defeitos de vacância na estrutura do MgO , motivado pela presença de Mn^{+3} .

Bittencourt (1995), trabalhou com um concentrado de flotação de magnesita de Brumado, para a produção do sínter M-30 pelo processo de dupla queima. Na etapa de calcinação da magnesita estudou o efeito de diferentes concentrações de cloreto de magnésio, acetato de magnésio e carbonato de lítio, adicionadas antes da queima. Na etapa de sinterização analisou o efeito da adição de zircônia, silicato de zircônio e pirofosfato de magnésio, com o propósito de aumentar o tamanho dos cristalitos de periclásio. Conclui que, tanto a adição de cloreto de magnésio na etapa de calcinação, como a adição de zircônia na etapa de sinterização, causam considerável aumento na densidade bruta do sínter obtido, bem como aumento no tamanho dos cristalitos de MgO . Na calcinação, com a

adição do cloreto de magnésio, a decomposição deste leva à formação de HCl que reage com a magnésia, formando vapor de cloreto de magnésio e vapor de água. A contínua formação e decomposição do cloreto de magnésio resulta na concomitante precipitação de magnésia sobre os cristalitos existentes. Tem-se, assim, significativo crescimento dos cristalitos de periclásio.

4. METODOLOGIA

4.1 – SISTEMÁTICA

A equipe de campo enviou cerca de 50kg de minério típico de cada mina do grupo mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba. Destas amostras, após observação macroscópica, foram selecionadas 13 sub-amostras para os estudos pilotos de caracterização e testes de queima, que constituem a parte experimental desta tese.

Inicialmente foram feitas análises químicas para a determinação da química global das amostras. Paralelamente foram feitas lâminas delgadas polidas para estudos em microscopia óptica, catodoluminescência e microanálise eletrônica. Lâminas de duplo polimento foram feitas para o estudo de inclusões fluidas.

Ainda nesta etapa preliminar foram feitas determinações mineralógicas por difratometria de raios-X e termogravimetria em todas as sub-amostras.

Por microscopia óptica (em luz transmitida e refletida) foi feita a identificação da mineralogia (transparentes e opacos), verificação das texturas e distribuição granulométrica. Também foi feito um estudo inicial das inclusões fluidas (IF).

Testes de queima foram executados com o intuito de se observar o comportamento do material pela ação da decomposição térmica e, assim, verificar-se as amostras sujeitas, ou não, ao fenômeno decrepitação.

Através de estereomicroscopia, complementada com microscopia eletrônica de varredura, fez-se uma avaliação do modo de desagregação das amostras submetidas ao processo de queima.

A análise dos resultados preliminares permitiu não só uma visão global e abrangente das características do material, mas o estabelecimento da abordagem que se faria em continuação para a consecução do objetivo do trabalho.

Numa segunda etapa fizeram-se estudos em microscopia óptica com a ajuda de catodoluminescência, o que permitiu a definição mais clara de diferentes tipos de

magnesita nas amostras e também melhor caracterização dos aspectos texturais, especialmente as relações de contatos entre os cristais de magnesita.

A seguir foi feito o estudo das inclusões fluidas e as microanálises. Durante a campanha de microanálise foram analisadas as magnesitas, a dolomita, o talco, a clorita e a hematita, completando-se, assim, a caracterização da química mineral das fases que constituem as amostras, identificáveis opticamente.

No estudo de inclusões fluidas, a ênfase foi para a verificação dos tipos de inclusões presentes, sua distribuição e tamanho. Através de testes de esmagamento procurou-se determinar a presença de gases. Foram esmagados cerca de 10 pequenos fragmentos de cada amostra, retirados dos mesmos tabletes dos quais foram feitas as lâminas para estudo das IF.

Nesta segunda etapa a difratometria de raios-X foi utilizada em estudos de refinamento de estrutura (método de Rietveld), para a determinação dos parâmetros cristalinos de algumas magnesitas (com diferente comportamento na queima) e averiguação de possível presença de tensões residuais. Utilizou-se o programa General Structure Analysis System, GSAS (Larson e Von Dreele, 2000). As amostras PP-BGF e TPP foram selecionadas para este estudo por apresentarem, efetivamente, comportamentos díspares com relação à decrepitação: PP-BGF esboroou em todos os testes de queima enquanto que TPP, normalmente, apenas se fragmentava (crepitava).

Novos testes de queima, utilizando-se dez amostras de cada minério, foram feitos com o objetivo de se verificar a reprodutibilidade da decrepitação observada no teste piloto e, desse modo, melhorar a correlação entre o efeito e as possíveis causas.

Testes complementares de análises termogravimétricas foram feitos para confirmar, ou não, variações nos termogramas obtidos na primeira etapa.

Finalmente foi feito estudo em microscopia eletrônica de varredura, nos finos gerados no material utilizado nos testes de queima, para observação dos aspectos microestruturais do material calcinado.

4.2 – EQUIPAMENTO UTILIZADO

No laboratório de análises do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Magnesita S.A., foram feitas as análises por difratometria de raios-X (DRX), em um difratômetro Philips, modelo PW-1730 e análises quantitativas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) em um espectrômetro Philips modelo MAGX-PRO. Finalmente as análises termogravimétricas foram realizadas em um analisador simultâneo Netzsch, modelo STA 409 C, enquanto que as determinações de perda ao fogo (PF) foram realizadas em um equipamento TGA-601 da LECO Corporation.

Nos laboratórios do CDTN/CNEN, foram feitos os estudos microscópicos (petrográficos e de inclusões fluidas) e análise química qualitativa por fluorescência de raios-X (FRX). Utilizou-se para tal microscópios petrográficos Zeiss Oberkochen modelo Standard 18 e também em um Leitz modelo Ortoplan, ambos dotados de iluminação transmitida e refletida. Análises qualitativas (varredura completa) para verificação da presença de elementos não analisados quantitativamente, foram feitas em um espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo 3134.

No Departamento de Geociências da UFOP, foram realizados os estudos em catodoluminescência. O equipamento usado é da marca Technosyn, modelo 8200 MK II. Para o registro das imagens, utilizou-se filme Fujicolor ASA 400.

No Laboratório de Microanálises (LMA) do Consórcio UFMG-CDTN/CNEN, análises foram realizadas em uma microsonda JEOL, modelo JXA-8900R, dotada de quatro espectrômetros WDS e um espectrômetro EDS. Utilizou-se tensão de aceleração de 15kV, corrente de feixe de 20nA e feixe com 5 μ m de diâmetro. As preparações foram recobertas com uma película de grafita, evaporada sob alto vácuo, com a espessura de aproximadamente 250Å. Ver em Tabela 4-1 e em Tabela 4-2 o resumo das condições instrumentais e os padrões usados.

Tabela 4-1 – Rotina para análise de carbonatos, talco e clorita

| Elemento | Cristal | Tempo Pico* | Tempo Bkg* | Padrão |
|-----------------|----------------|--------------------|-------------------|---------------|
| Mg | TAP | 20 | 20 | Periclásio |
| Mn | LiF | 60 | 30 | Siderita |
| Fe | LiF | 60 | 30 | Siderita |
| Ca | PET | 60 | 30 | Dolomita |
| Al | TAP | 60 | 30 | Cianita |
| Si | PET | 60 | 30 | Albita |

* Tempos de contagem em segundos

Tabela 4-2 – Rotina para análise de hematitas

| Elemento | Cristal | Tempo Pico* | Tempo Bkg* | Padrão |
|-----------------|----------------|--------------------|-------------------|---------------|
| Al | TAP | 20 | 20 | Cianita |
| Mn | LiF | 20 | 20 | Hortonolita |
| Ti | PET | 20 | 20 | Rutilo |
| Mg | TAP | 20 | 20 | Hortonolita |
| Fe | LiF | 20 | 20 | Hematita |
| Si | PET | 20 | 20 | Cianita |

* Tempos de contagem em segundos

As siglas dos cristais analisadores utilizados correspondem a:

LiF = Lithium fluoride, $2d = 4.028 \text{ \AA}$

PET = Pentaerythritol, $2d = 8.742 \text{ \AA}$

TAP = Thallium acid pthalate, $2d = 25.75 \text{ \AA}$

Os estudos de microscopia eletrônica de varredura foram realizados em um microscópio JEOL modelo JSM-840A. Utilizou-se tensão de aceleração de 20 kV e corrente de feixe de 60 pA. As amostras estudadas foram recobertas com uma película de ouro, com aproximadamente 250 \AA , obtida em um “ion sputtering” fabricado pela empresa Edwards.

5. RESULTADOS

As amostras estudadas foram coletadas pelo pessoal de operação do complexo mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba. Foram selecionadas amostras consideradas como típicas de cada mina. Da mina de Pedra Preta foram enviadas, além da amostra considerada típica, três outras amostras com características particulares para serem analisadas também: a PP-704, a PP-RGF e a PP-BGF. A primeira (PP-704) por ter apresentado comportamento anômalo em relação à Pedra Preta típica. As outras duas (PP-RGF e PP-BGF) constituem um fácies com granulometria bastante fina relativamente ao normal do minério Pedra Preta.

Das amostras recebidas, em número de seis, num total aproximado de 200 kg, foram selecionados fragmentos representativos do conjunto para realização das análises. A Tabela 5-1 traz a codificação que será utilizada no decorrer do trabalho.

Tabela 5-1 – Amostras estudadas com respectivas codificações.

| Codificação | Descrição |
|--------------------|--------------------------------|
| TJ | Típico Jatobá |
| TP | Típico Pomba |
| TPP | Típico Pedra Preta |
| PP-704 | Pedra Preta 704 |
| PP-RGF | Pedra Preta Rosa de Grã Fina |
| PP-BGF | Pedra Preta Branca de Grã Fina |

5.1 – ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas para os elementos normalmente considerados para o controle de qualidade da matéria-prima usada pela Magnesita S. A. são exibidas na Tabela 5-2. Foram realizadas utilizando-se a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) em um espectrômetro Philips modelo MAGX-PRO. A perda ao fogo foi determinada usando-se um equipamento TGA-601 da LECO

Corporation. Os resultados, em percentagem ponderal, são expressos em base calcinada.

Para complementar a informação foi feita, também por FRX, varredura completa, visando a determinação de possíveis outros elementos. Este estudo foi feito em um espectrômetro Rigaku modelo 3134, no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do CDTN. O resultado está colocado na Tabela 5-3.

Tabela 5-2 – Resultados de análises químicas por FRX efetuadas no CPqD da Magnesita S. A.

| Amostra | SiO₂ | Al₂O₃ | Cr₂O₃ | Fe₂O₃ | MnO | CaO | MgO | PF |
|----------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|------------|-----------|
| TJ-A | 1,10 | 0,08 | 0,00 | 0,21 | 0,12 | 0,66 | 97,83 | 51.62 |
| TJ-B | 1,58 | 0,02 | 0,00 | 1,41 | 0,24 | 0,38 | 96,37 | 51.24 |
| TJ-C | 4,60 | 0,21 | 0,00 | 0,71 | 0,18 | 0,55 | 93,75 | 50.10 |
| TP-A | 0,30 | 0,09 | 0,00 | 0,27 | 0,11 | 0,99 | 98,24 | 51.94 |
| TP-B | 2,45 | 0,08 | 0,00 | 0,39 | 0,09 | 0,74 | 96,25 | 51.10 |
| TPP-A | 0,71 | 0,19 | 0,00 | 1,05 | 0,85 | 0,51 | 96,69 | 51.53 |
| TPP-B | 0,07 | 0,04 | 0,00 | 0,78 | 1,11 | 0,37 | 97,63 | 51.86 |
| PP-704-A | 0,71 | 0,12 | 0,00 | 0,64 | 0,64 | 0,39 | 97,37 | 51.66 |
| PP-704-B | 0,60 | 0,16 | 0,00 | 0,97 | 0,82 | 0,42 | 97,03 | 51.60 |
| PP-RGF-A | 2,15 | 0,04 | 0,00 | 0,44 | 0,17 | 0,54 | 96,66 | 51.23 |
| PP-RGF-B | 4,28 | 0,02 | 0,00 | 0,44 | 0,19 | 0,54 | 94,53 | 50.44 |
| PP-BGF-A | 0,89 | 0,28 | 0,03 | 0,47 | 0,31 | 0,62 | 97,40 | 51.59 |
| PP-BGF-B | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,59 | 0,22 | 0,48 | 98,57 | 51.99 |

Tabela 5-3 – Análises químicas qualitativas (varredura completa) por FRX efetuadas no CDTN.

| Amostra | Elementos Identificados |
|----------------|--------------------------------|
| TJ-B | Mg, Si, Fe, Ca, Mn, Ti, K, Cu |
| TP-A | Mg, Si, Ca, Fe, Mn, Ti, Al |
| TPP-A | Mg, Mn, Fe, Ca, Ti, Si, K, Cu |
| PP704-A | Mg, Mn, Fe, Ca, Si, Ti, K, Cu |
| PP-RGF-A | Mg, Ca, Fe, Si, Mn, Ti, K |
| PP-BGF-A | Mg, Si, Fe, Ca, Mn, Ti, Cu |

5.2 – DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

Análises por difratometria de raios-X, efetuadas em um difratômetro Philips, modelo PW-1730, mostram a presença de magnesita como constituinte predominante (P) e dolomita como traço (t) em todas as amostras estudadas. Talco aparece como constituinte menor (m) nas amostras da mina Jatobá, ocorrendo como traço nas amostras restantes.

A Figura 5-1 ilustra um típico difratograma para as amostras estudadas. Magnesita, sendo o mineral predominante, é responsável pela maioria dos picos observados. Do talco e da dolomita apenas alguns dos picos mais intensos estão presentes.

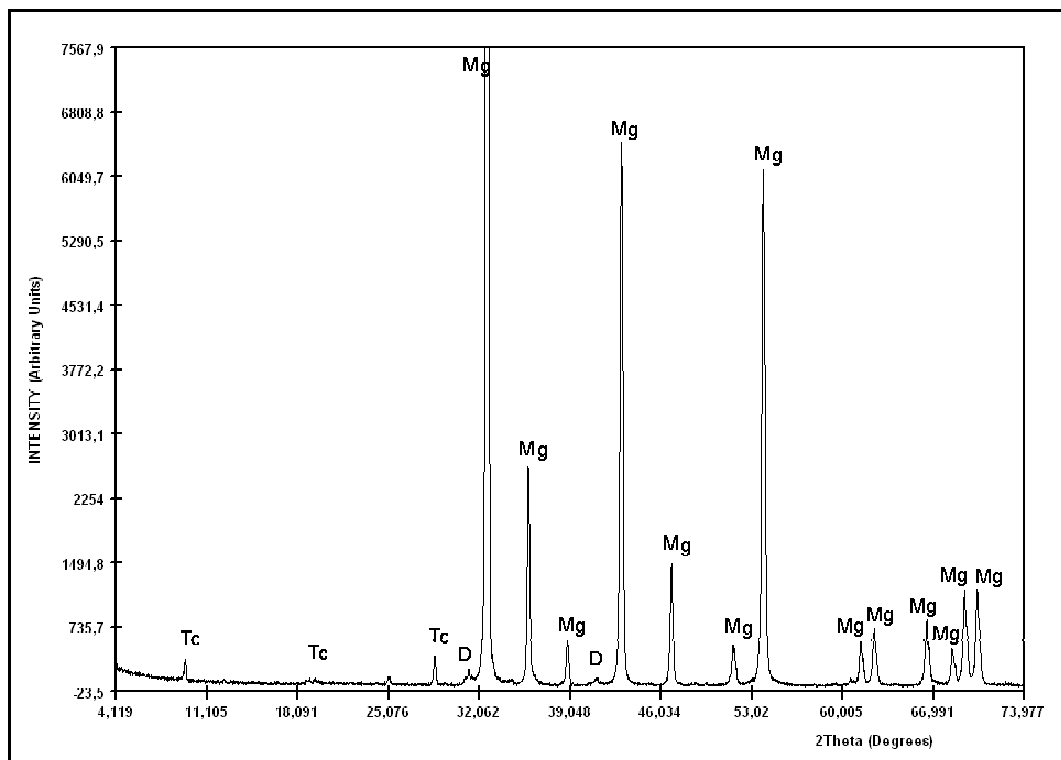


Figura 5-1 – Difratograma para a amostra TJ-A

Legenda: Tc = talco; D = dolomita; Mg = magnesita.

A Tabela 5-4 resume os resultados dos estudos difratométricos. As letras P, m e t representam estimativa de concentração das fases mineralógicas identificadas em cada amostra. P refere-se a predominante (maior que 50%), m a menor (entre 1% e 10%) e t a traço (menor que 1%).

Tabela 5-4 – Resultado de análises por difratometria de raios-X

| Amostra | Magnesita | Talco | Dolomita |
|----------------|------------------|--------------|-----------------|
| TJ-A | P | m | t |
| TJ-B | P | m | t |
| TJ-C | P | m | t |
| TP-A | P | t | t |
| TP-B | P | t | t |
| TPP-A | P | t | t |
| TPP-B | P | t | t |
| PP-704-A | P | t | t |
| PP-704-B | P | t | t |
| PP-RGF-A | P | t | t |
| PP-RGF-B | P | t | t |
| PP-BGF-A | P | t | t |
| PP-BGF-B | P | t | t |

Em difratogramas especialmente obtidos para este fim (varredura lenta), utilizando-se o programa GSAS (Larson e Van Dreele, 2000), foi feito o refinamento de estrutura em duas amostras de magnesita. Foram escolhidas para o estudo as amostras TPP-A e PP-BGF-A, que deram resultados díspares no teste de queima. A última esboroou enquanto a primeira manteve coerência. Da amostra TPP-A isolou-se cristais de magnesita vermelha e de magnesita branca para a comparação de seus parâmetros.

Tabela 5-5 – Parâmetros da estrutura cristalina obtidos pelo método Rietveld

| Amostra | a (Å) | c (Å) | M-O (Å) |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| TPP-A | 4,63097 | 15,00879 | 2,09802 |
| (branca) | (±0,00007) | (±0,00024) | (±0,00024) |
| TPP-A | 4,63143 | 15,01286 | 2,09734 |
| (vermelha) | (±0,00007) | (±0,00025) | (±0,00024) |
| PP-BGF -A | 4,63405 | 15,01486 | 2,09699 |
| | (±0,00005) | (±0,00025) | (±0,00034) |

Dados do refinamento obtidos por João Batista dos Santos Barbosa, físico do CDTN.
Entre parênteses são dados os desvios padrão calculados para cada medida.

5.3 – MICROSCOPIA ÓPTICA

Macroscopicamente, as amostras estudadas apresentam tamanho de grão grosso a médio, as mais finas mostrando uma textura sacaroidal. As de grão mais grosso exibem cristais de magnesita com tamanho centimétrico. Em algumas, pode-se observar venulação e um aspecto quase brechóide. As vênulas são, de modo geral, preenchidas por magnesita de coloração branca. Não é observável nenhuma orientação dos minerais. A coloração quase sempre apresenta matizes de vermelho, podendo, no entanto ser de um branco puro.

No estudo por microscopia óptica, em luz polarizada transmitida, observa-se que em todas as amostras o mineral predominante é a magnesita. Este mineral ocorre em cristais de granulometria grossa a média, normalmente sem nenhuma orientação preferencial e tendência para textura não planar ou planar sub, de acordo com a classificação proposta por Sibley e Gregg (1987), e distribuição granulométrica normalmente polimodal. A magnesita de granulação mais fina, normalmente intergranular, é branca ou incolor e com contatos granulares simples ou retos. Da Figura 5-2 a Figura 5-13 são mostrados os aspectos mencionados.

Talco ocorre em percentagem bastante baixa, sendo mais expressivo apenas nas amostras da mina Jatobá. Quando não está em veios compactos, apresenta-se intergranularmente disperso ou em pequenos aglomerados. Este mineral, pela sua disposição, às vezes sugere alguma orientação.

Todas as amostras, com exceção da PP-BGF, mostraram a presença de um mineral micáceo, normalmente em palhetas curtas, incolores e de birrefringência baixa. Este foi identificado, através de microanálise, como uma clorita magnesiana, com uma composição próxima da de um clinocloro ou de uma peninita. Aparentemente é a principal fonte de alumínio no minério.

Mineral opaco, identificado como hematita através de suas propriedades em luz polarizada refletida, aparece também escassamente, sendo um pouco mais freqüente na amostra PP-704, acompanhando veio de magnesita de granulometria mais fina.

A magnesita ocorre em três tipos que se distinguem principalmente pela coloração. Uma delas mostra presença de poeira vermelha de óxido de ferro (confirmada como hematita através da microanálise eletrônica) que lhe confere a cor macroscopicamente marrom-avermelhada. Esta foi denominada magnesita vermelha. A outra, chamada de magnesita branca, é reconhecida macroscopicamente por sua coloração branco leitosa. Esta mostra pouca ou nenhuma inclusão de poeira de opacos. Tem, no entanto, numerosas inclusões sólidas de tamanho muito pequeno (normalmente abaixo de 10 μ m) que foram identificados como dolomita através da microanálise eletrônica. Finalmente distingue-se uma magnesita, denominada incolor, quase perfeitamente límpida. Esta magnesita incolor é reconhecida facilmente em lâmina delgada mas não macroscopicamente, sendo confundida com a branca. A coluna Ger. Mag. (Gerações de Magnesita), na Tabela 5-6, indica apenas se a amostra em questão tem as duas magnesitas (vermelha e branca) ou apenas uma (a branca e a incolor).

Um outro aspecto diferencial é que os cristais de magnesita vermelha normalmente apresentam extinção irregular ou ondulante, mais ou menos intensa e são xenomorfos. A magnesita branca não apresenta extinção ondulante e seus cristais têm alguma tendência para hipidiomorfos. Quando a amostra apresenta uma única variedade, trata-se da magnesita branca. Nenhuma das três variedades exibe geminações ou maclas.

Quando se tem na mesma amostra magnesita vermelha e branca, o fato da magnesita vermelha apresentar extinção ondulante enquanto a branca não, faz crer que a primeira seja de uma geração anterior, tendo sofrido tectonismo que não afetou a segunda.

Estão presentes, em algumas amostras, venulações de magnesita branca, com granulometria mais fina, sempre acompanhada de talco. Também presentes estão veios de talco.

Como minerais acessórios encontraram-se rutilo incluído na magnesita e/ou associado a hematita de granulação mais grossa. Zirconita, apatita, monazita e possível **derbylita** também foram encontrados. A composição destes minerais está referida na seção de microanálise.

Na Tabela 5-6 resumem-se as observações feitas no estudo microscópico.

Tabela 5-6 – Resumo das características microscópicas.

| Amostra | Mineralogia | Ger.Mag. | Grão | Contatos | Ext.Ond. |
|----------------|--------------------|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|
| TJ-A | mg, tc | 1 | g, p | Simples | não |
| TJ-B | mg, tc, op | 1 | g, p | Simples | não |
| TJ-C | mg, tc, op | 2 | m, p | Lobados | sim |
| TP-A | mg, tc, op | 1 | g, p | Suturados | sim |
| TP-B | mg, tc | 2 | m, u | Simples | sim |
| TPP-A | mg, tc, op | 2 | g, u | Suturados | sim |
| TPP-B | mg, tc, op | 2 | g, p | Suturados | sim |
| PP-704-A | mg, tc, op | 2 | m, p | Simples | sim |
| PP-704-B | mg, tc, op | 2 | g, p | Lobados | sim |
| PP-RGF-A | mg, tc | 2 | m, u | Lobados | sim |
| PP-RGF-B | mg, tc | 2 | m, u | Lobados | não |
| PP-BGF-A | mg, tc | 2 | m, u | Lobados | não |
| PP-BGF-B | mg, tc | 2 | m, p | Simples | não |

Mineralogia ⇒ mg = magnesita; tc = talco; op = opacos

Grão ⇒ g = grosso; m = médio; Distribuição ⇒ u = unimodal; p = polimodal

A seguir são mostrados, com mais detalhe, os estudos microscópicos realizados nas amostras.

5.3.1 – Amostra TJ



Figura 5-2 – Aspecto macroscópico da amostra TJ

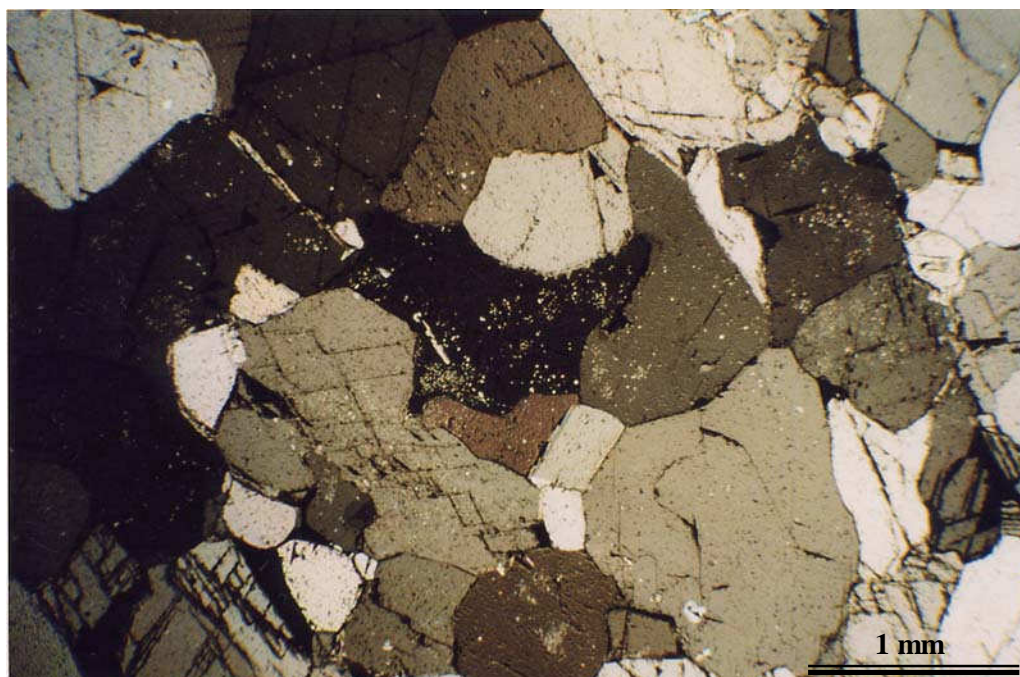


Figura 5-3 – Aspecto microscópico da amostra TJ. Nicóis cruzados.

Tabela 5-7 – Mineralogia da amostra TJ

| Constituinte | % estimada | Tamanho de cristal (mm) |
|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| Magnesita | P | 0,5 x 0,7 a 4,6 x 9,0 |
| Dolomita | t | 0,03 a 0,12 |
| Talco | t | 0,07 x 0,17 a 0,2 x 1,0 |
| Clorita | t | 0,2 a 0,6 |
| Opacos | t | 0,03 a 0,14 |
| Rutilo | t | 0,01 x 0,02 a 0,04 x 0,06 |
| Apatita | t | < 0,009 x 0,09 |

Descrição

A magnesita apresenta-se inequigranular, com grande variação no tamanho dos grãos. Varia desde 0,5 a 9,0 mm. Tem abundantes inclusões de dolomita muito fina. Este segundo carbonato tem uma tendência a se concentrar na porção central dos grãos, que mostram as bordas límpidas, numa sugestão de substituição. A magnesita mais fina ocorre intergranularmente, sendo hipidiomorfa a quase idiomorfa, com contatos lineares.

Os opacos ocorrem como finíssimas inclusões pulverulentas na magnesita que pode apresentar coloração avermelhada. Também ocorrem como partículas maiores intergranulares.

Talco ocorre sob a forma de finas palhetas inclusas na magnesita e também em palhetas maiores, que ocorrem intergranularmente, com alguma sugestão de orientação.

Rutilo aparece incluso na magnesita e também associado aos opacos de maior tamanho.

Apatita foi observada como inclusão na magnesita.

5.3.2 – Amostra TP



Figura 5-4 – Aspecto macroscópico da amostra TP

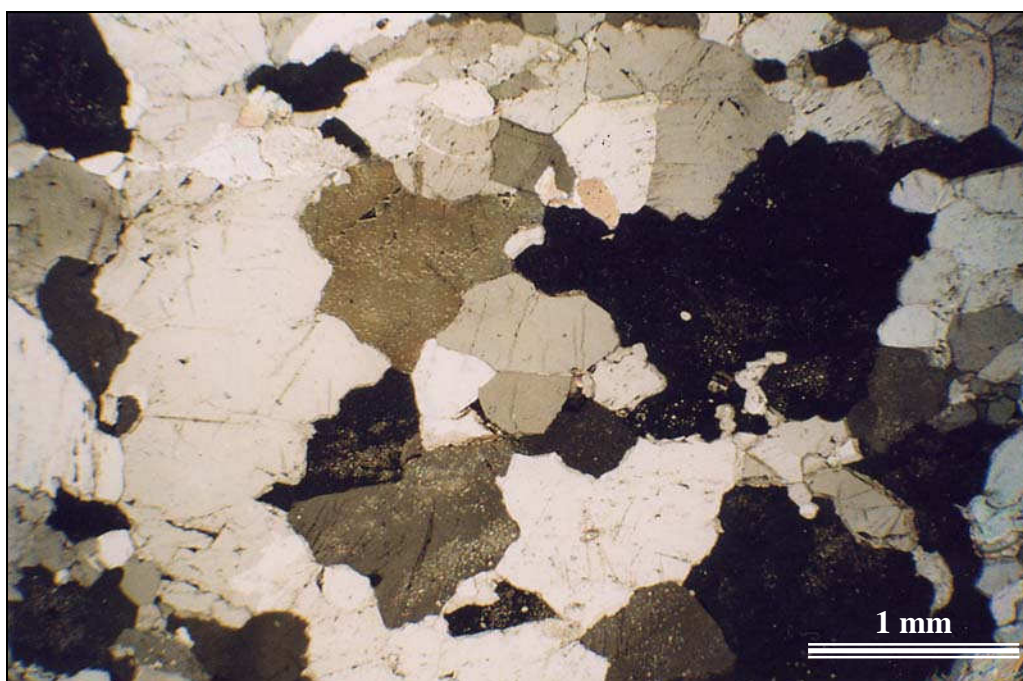


Figura 5-5 – Aspecto microscópico da amostra TP. Nicóis cruzados.

Tabela 5-8 – Mineralogia da amostra TP

| Constituinte | % estimada | Tamanho de cristal (mm) |
|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| Magnesita | P | 0,5 x 0,7 a 1,5 x 3,0 |
| Dolomita | t | < 0,02 |
| Talco | t | < 0,07 x 0,2 |
| Clorita | t | |
| Opacos | t | < 0,07 |
| Rutilo | t | < 0,01 |

Descrição

A magnesita apresenta-se predominantemente inequigranular e hipidiomorfa, sendo dos tipos branca ou incolor. O tamanho de grão, em geral, não excede 3 mm. Os contatos entre os grãos são, em sua maioria, retilíneos. Exibe inclusões muito finas de dolomita. Há escassos grãos xenomorfos, com contatos dentados com inclusões de fina poeira de opacos. Trata-se da magnesita vermelha. Esta não apresenta inclusões de dolomita.

Talco, em finas palhetas, distribui-se principalmente entre os grãos, mostrando alguma suborientação. Rutilo ocorre como inclusões muito finas na magnesita.

5.3.3 - Amostra TPP

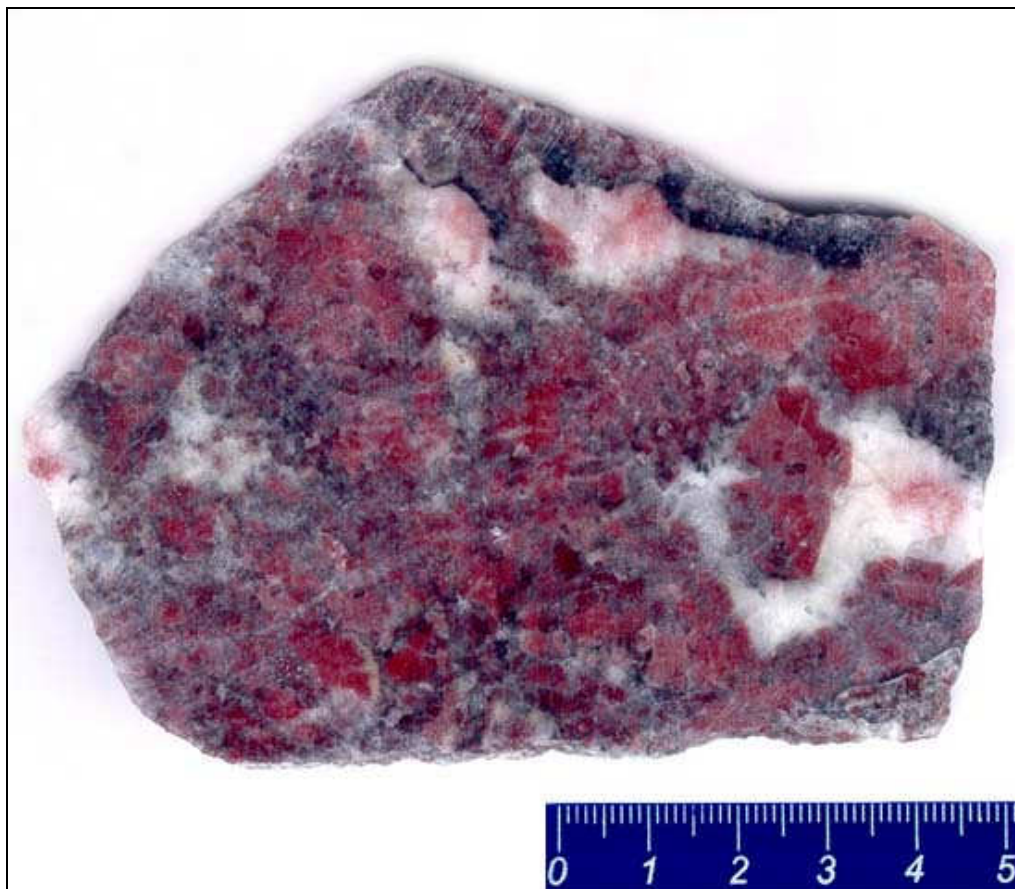


Figura 5-6 – Aspecto macroscópico da amostra TPP



Figura 5-7 – Aspecto microscópico da amostra TPP. Nicóis cruzados.

Tabela 5-9 – Mineralogia da amostra TPP

| Constituinte | % estimada | Tamanho de cristal (mm) |
|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| Magnesita | P | 0,14 x 0,18 a 4,6 x 10,6 |
| Dolomita | t | < 0,02 |
| Talco | t | 0,2 x 0,4 a 0,03 x 0,7 |
| Clorita | t | |
| Opacos | t | 0,02 a 0,05 |
| Rutilo | t | < 0,05 |

Descrição

A magnesita neste tipo de minério é de granulometria predominantemente grossa, centimétrica. É xenomorfa e exibe contatos dentados. Macroscopicamente, distinguem-se dois tipos óbvios de magnesita denunciados pela sua coloração: vermelha e branca. Microscopicamente pode-se distinguir também uma incolor. A coloração vermelha advém de numerosas inclusões de material opaco finamente disperso. Na magnesita branca tem-se inclusões de dolomita, algum mineral opaco e finas palhetas de talco.

Talco, além das finíssimas inclusões na magnesita também ocorre como palhetas mais desenvolvidas, distribuídas intergranularmente ou em pequenas concentrações. Rutilo pode aparecer como inclusões na magnesita ou associado aos opacos.

5.3.4 – Amostra PP-704



Figura 5-8 – Aspecto macroscópico da amostra PP-704

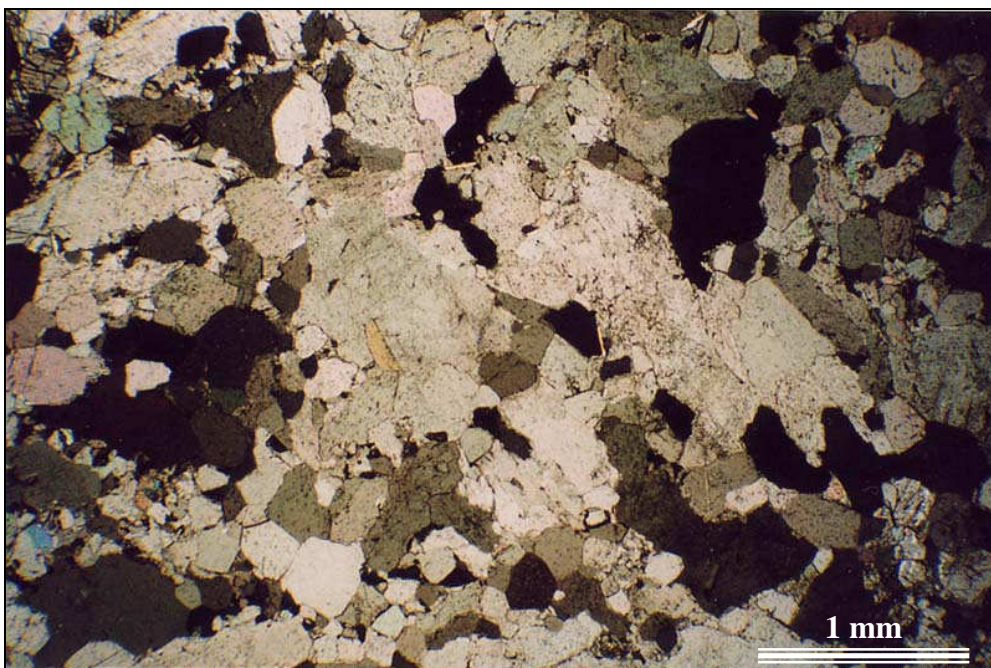


Figura 5-9 – Aspecto microscópico da amostra PP-704. Nicóis cruzados.

Tabela 5-10 – Mineralogia da amostra PP-704

| Constituinte | % estimada | Tamanho de cristal (mm) |
|---------------------|-------------------|--|
| Magnesita | P | 1) 0,5 x 0,9 a 2,8 x 5,6 2) 0,2 a 1,4 |
| Dolomita | t | < 0,02 |
| Talco | t | 0,02 x 0,4 a 0,07 x 1,3 |
| Clorita | t | |
| Opacos | t | <0,07 |

Descrição

A magnesita apresenta-se em duas formas distintas:

1. cristais inequigranulares quase centimétricos, hipidiomorfos a xenomorfos, nos quais os contatos intergranulares são dentados.
2. cristais predominantemente hipidiomorfos, equigranulares e com contatos lineares (ou retos) e distribuição de diâmetros de cristais mais fina que no tipo anterior.

A dolomita ocorre como inclusões muito pequenas na magnesita.

Os opacos ocorrem como fina poeira na magnesita do tipo 1, conferindo a esta uma coloração avermelhada. Talco ocorre preferencialmente como inclusões muito finas na magnesita ou intergranularmente, associado à magnesita mais fina e de contatos retilíneos.

5.3.5 – Amostra PP-RGF

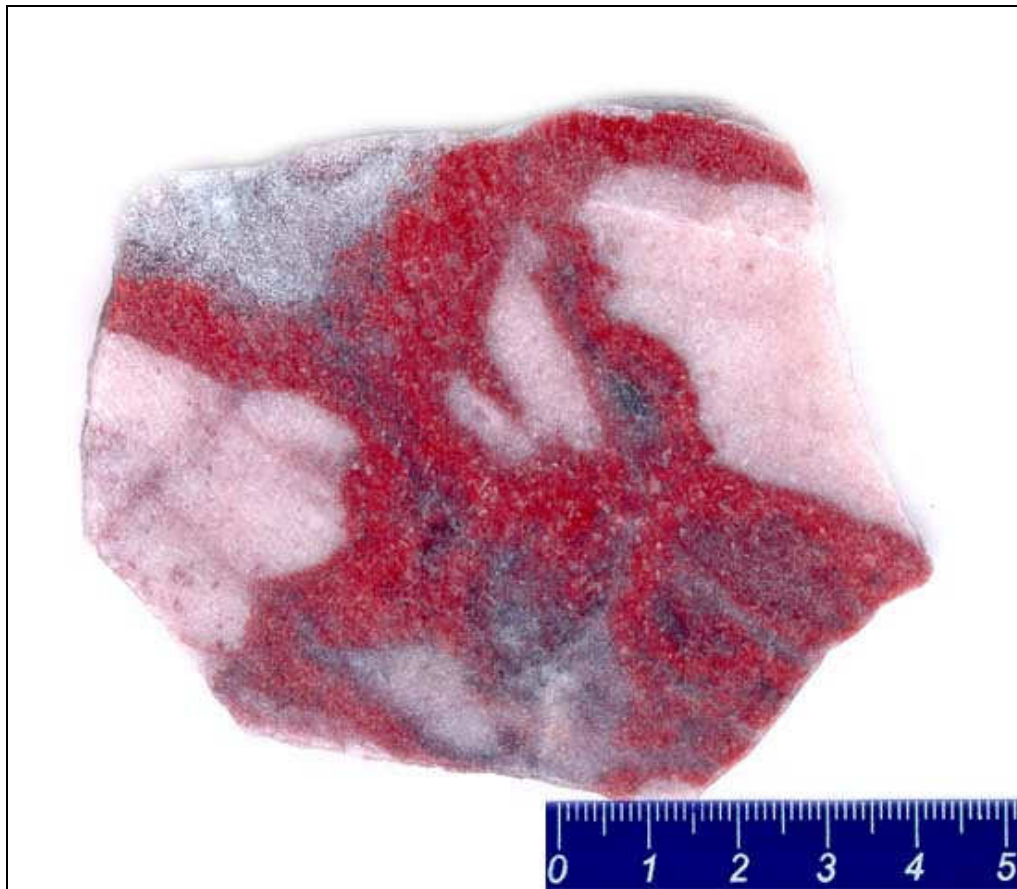


Figura 5-10 – Aspecto macroscópico da amostra PP-RGF

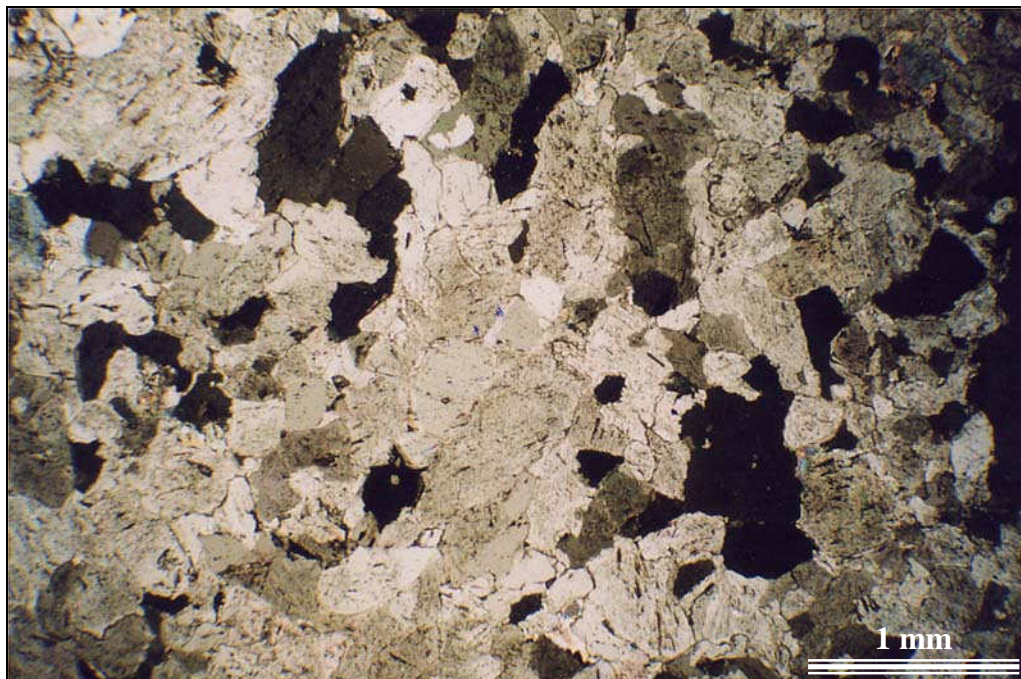


Figura 5-11 – Aspecto microscópico da amostra PP-RGF. Nicóis cruzados.

Tabela 5-11 – Mineralogia da amostra PP-RGF

| Constituinte | % estimada | Tamanho de cristal (mm) |
|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| Magnesita | P | 0,4 x 0,4 a 1,1 x 1,6 |
| Dolomita | t | < 0,02 |
| Talco | t | < 0,03 x 0,12 |
| Clorita | t | |
| Rutilo | t | |
| Opacos | t | < 0,01 |

Descrição

A magnesita é xenomorfa e apresenta-se com seus contatos suturados ou dentados. A distribuição de diâmetros de cristais é predominantemente média. Tem poucas inclusões de dolomita e menos ainda de talco. Rutilo ocorre em cristais muito finos. As inclusões de opacos, sob a forma de poeira finamente dispersa, ocorre colorindo de vermelho a magnesita. São distinguíveis, também, microscopicamente, as variedades branca e incolor.

Notáveis são as vênulas de magnesita vermelha cortando a rocha em diferentes direções.

5.3.6 – Amostra PP-BGF



Figura 5-12 – Aspecto macroscópico da amostra PP-BGF

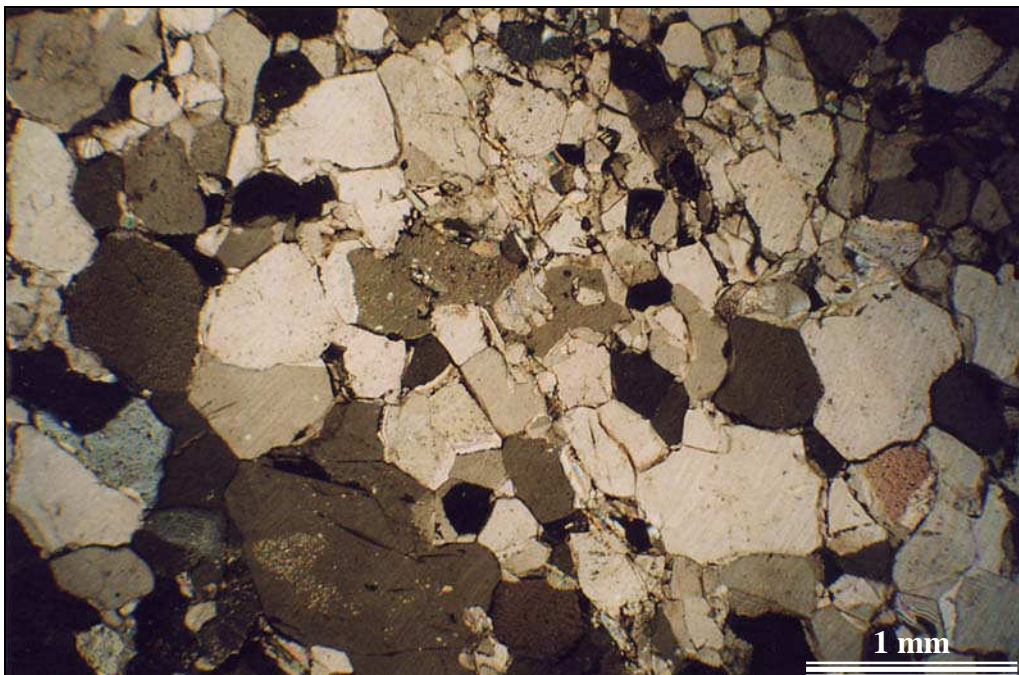


Figura 5-13 – Aspecto microscópico da amostra PP-BGF. Nicóis cruzados.

Tabela 5-12 – Mineralogia da amostra PP-BGF

| Constituinte | % estimada | Tamanho de cristal (mm) |
|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| Magnesita | P | 0,27 x 0,32 a 0,64 x 0,92 |
| Dolomita | t | < 0,02 |
| Talco | t | < 0,09 x 0,64 |
| Opacos | t | < 0,09 |
| Rutilo | t | < 0,003 x 0,07 |

Descrição

A magnesita apresenta-se com distribuição de diâmetros de cristais média, mostrando-se hipidiomorfa a xenomorfa, com contatos predominantemente retilíneos, numa textura sacaroidal. Pode ocorrer, também, em grãos finos que, associados a talco intergranular, sugere alguma orientação.

Dolomita muito fina ocorre como inclusões na magnesita bem como o rutilo e também os opacos. Estes últimos aparecem como fina poeira dispersa em alguns grãos da magnesita que é, predominantemente, branca com alguns grãos incolores.

5.4 – INCLUSÕES FLUIDAS

As fotomicrografias em Figura 5-14 à Figura 5-17 ilustram a presença de inclusões fluidas em algumas das amostras estudadas. As inclusões observadas são bifásicas ou trifásicas, possivelmente aquocarbônicas com um ou mais sólidos. Testes com uma platina de esmagamento foram feitos nas amostras para verificar a presença de gases nas inclusões destas. Embora seja de caráter eminentemente qualitativo, tal teste indicou que as amostras têm pouco ou nenhum gás, uma vez que durante o esmagamento praticamente não se observa a evolução de bolhas.

De modo geral, as inclusões nas diversas amostras são bastante similares, em tamanho e na constituição, tanto as consideradas primárias quanto as secundárias (ou pseudo-secundárias).

Além de inclusões dispersas, observam-se inclusões ao longo de planos. O tamanho médio das inclusões observadas variou entre 5 e 10 μm . Bem poucas inclusões observadas tinham tamanho superior a 10 μm , podendo atingir 15 μm .

Estudos foram realizados numa tentativa de se obter parâmetros que permitissem a identificação positiva das fases presentes e a sua variação nas diferentes gerações de magnesita. À parte o fato de que as magnesitas brancas parecem ter uma quantidade algo maior que as vermelhas e as incolores, não se encontraram, no entanto, diferenças marcantes.

Embora seja possível a determinação de outros dados tais como a pressão de confinamento e a temperatura das soluções formadoras, tais estudos não foram realizados em função da exigüidade de tempo. De antemão, já pode-se antever uma operação muito laboriosa devido à complexidade destas inclusões.

Apenas como ilustração, Roedder (1972) mostra uma inclusão fluida encontrada em uma amostra de Brumado (cedida por Bodenlos), que continha nada menos que 14 cristais, dos quais pelo menos 7 eram diferentes fases.

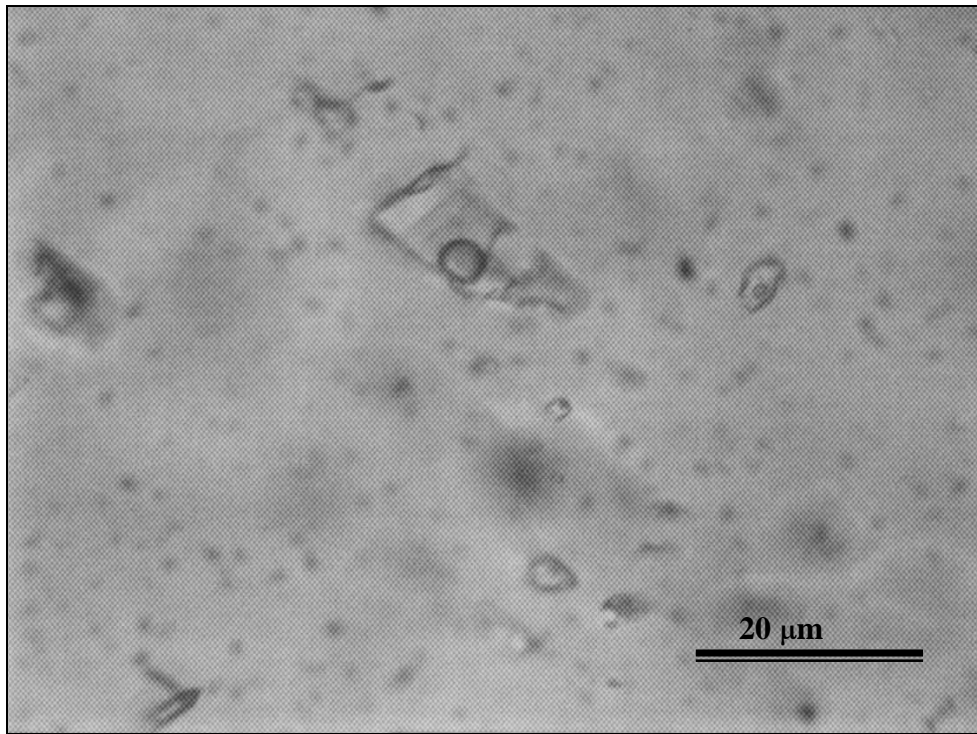


Figura 5-14 – Fotomicrografia de inclusões fluidas na amostra TPP-B (Mina Pedra Preta)

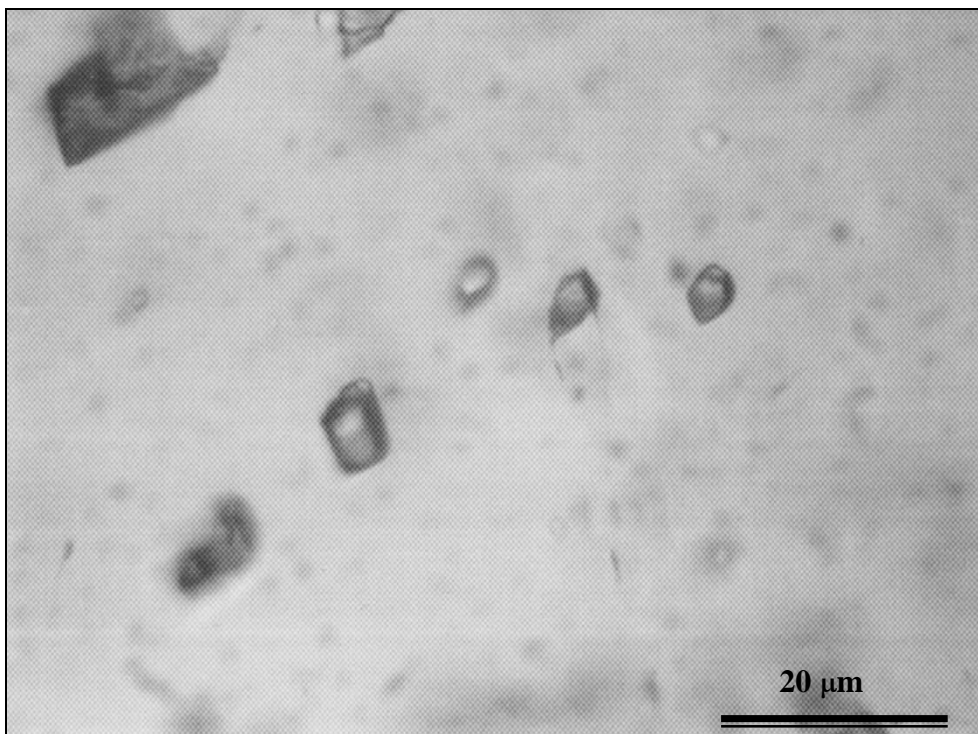


Figura 5-15 – Fotomicrografia de inclusões fluidas na amostra TJ-C (Mina Jatobá)

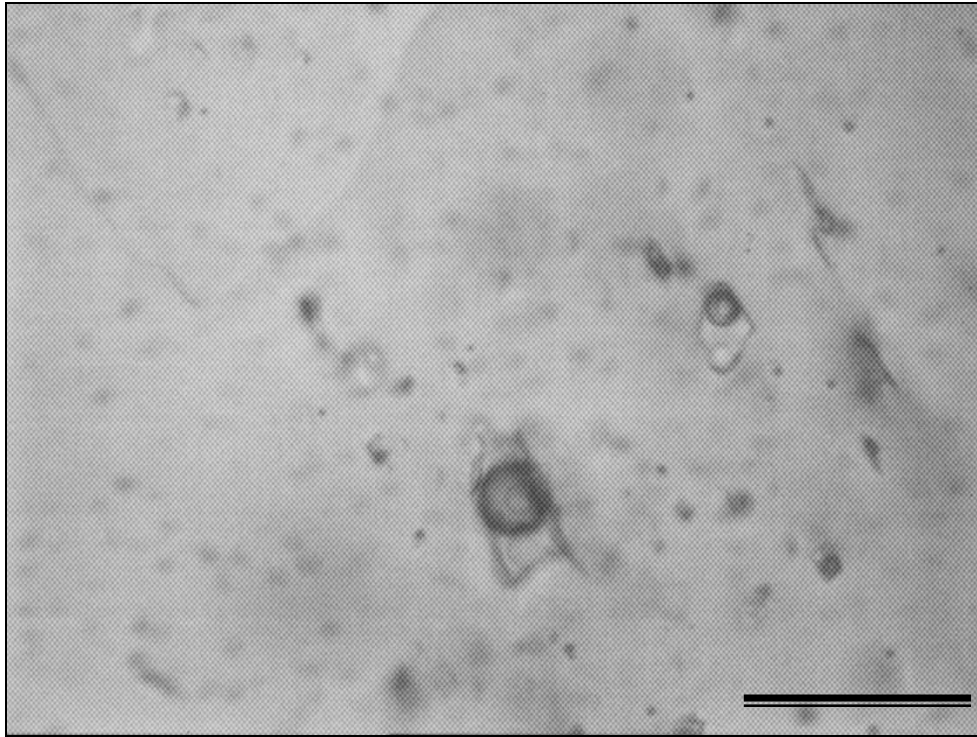


Figura 5-16 – Fotomicrografia de inclusões fluidas na amostra TP-B (Mina Pomba)

Em estudo mais detalhado da amostra TPP-B, verifica-se que as IF primárias são constituídas por $H_2O + CO_2 +$ Sólidos (Figura 5-14, Figura 5-17 e Figura 5-18).

Os sólidos, que aparecem nessas IF são, provavelmente, um sal que não NaCl, pois não apresentam formas cúbicas típicas dessa fase, além de apresentarem uma fraca birrefringência. Estimar que 20 a 30% do volume da inclusão correspondem a CO_2 constitui uma avaliação razoável.

Este padrão de inclusões foi observado de modo geral em toda a lâmina, podendo as IF ilustradas, portanto, serem consideradas representativas. Inclusões secundárias com diferente padrão foram observadas em possíveis planos de fratura.

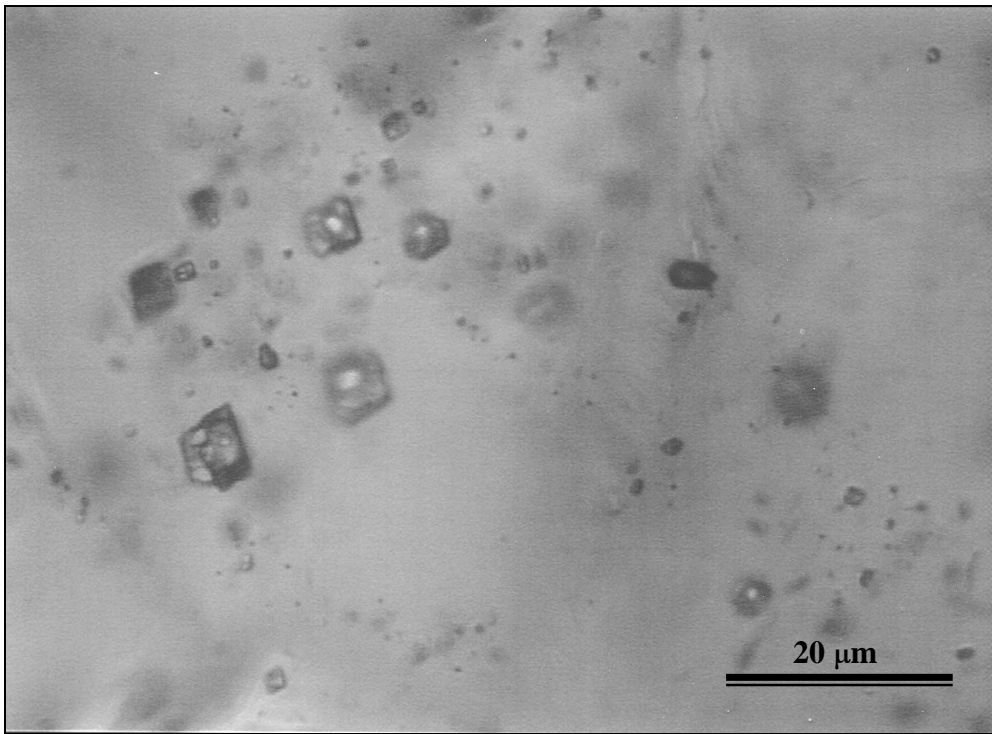


Figura 5-17 – Fotomicrografia de inclusões fluidas trifásicas (Líquido + sólido + gás) na amostra TPP-B.

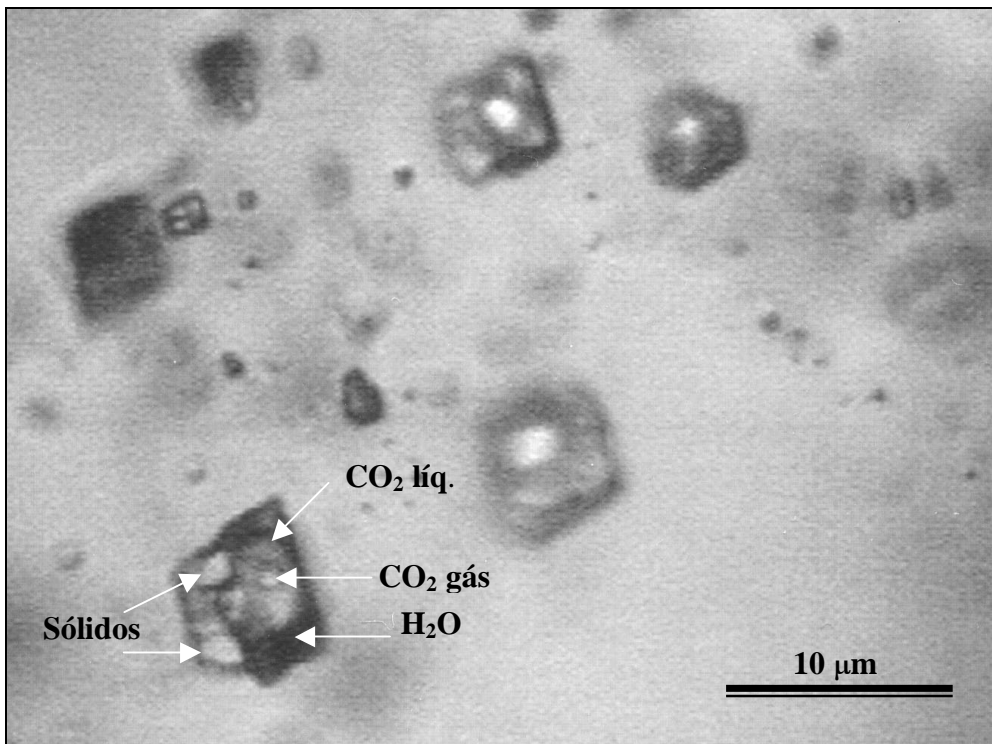


Figura 5-18 - Ampliação da Figura 5-17 para mostrar detalhes de uma inclusão.

Testes expeditos de aquecimento e resfriamento indicaram uma temperatura de homogeneização (Th) do CO₂ de aproximadamente 25°C.

Supondo que se trate de CO₂ puro, conforme analisado por espectroscopia micro Raman nas inclusões fluidas de magnesitas da mina Pirajá, também na Serra das Éguas (Kazuo Fuzikawa: comunicação verbal), verifica-se, num diagrama de fases para CO₂, Figura 5-19, que a densidade deste para a Th observada é de cerca de 0,77 g/cm³ (linha tracejada).

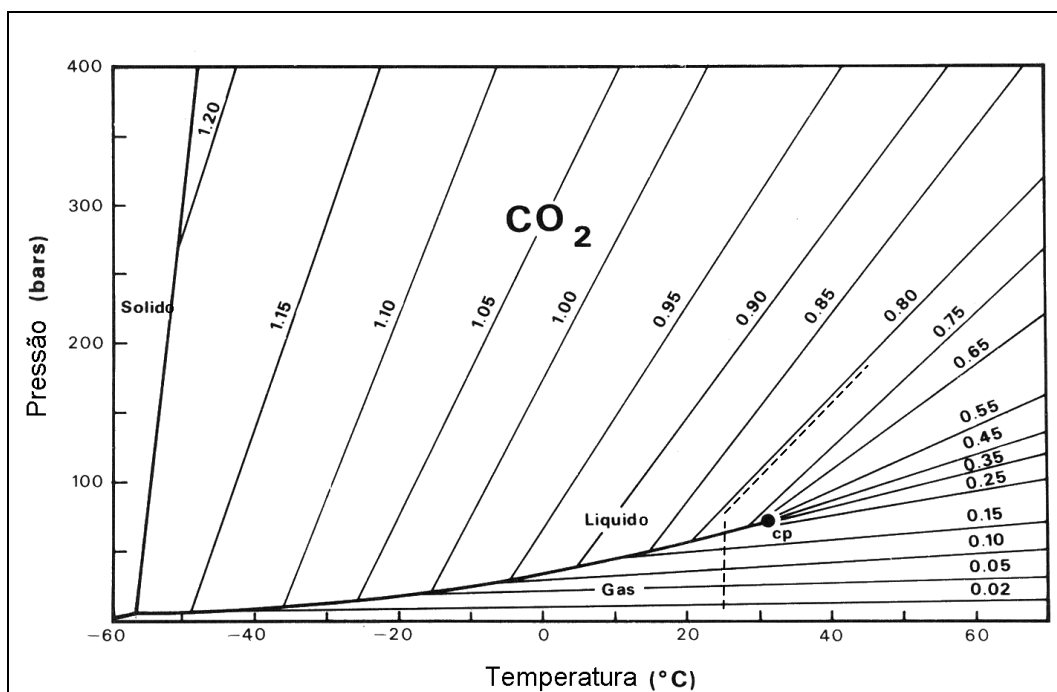


Figura 5-19 - Diagrama de fases para o CO₂
Adaptada de Hollister (1981)

No sistema H₂O-CO₂ puros, pode-se ver na Figura 5-20, que o solvus desse sistema para a proporção 30-70, indicaria uma temperatura máxima de cerca de 260°C. Observa-se também nesse diagrama que uma salinidade crescente (NaCl) da solução eleva rapidamente a temperatura desse solvus.

Nas IF em estudo nota-se a presença de fases sólidas, o que indica uma solução supersaturada. Mesmo sem saber o tipo de sal presente, comparando-se as duas

situações, estimar uma temperatura de no mínimo 400°C como a T de aprisionamento dessas IF seria uma cogitação razoável.

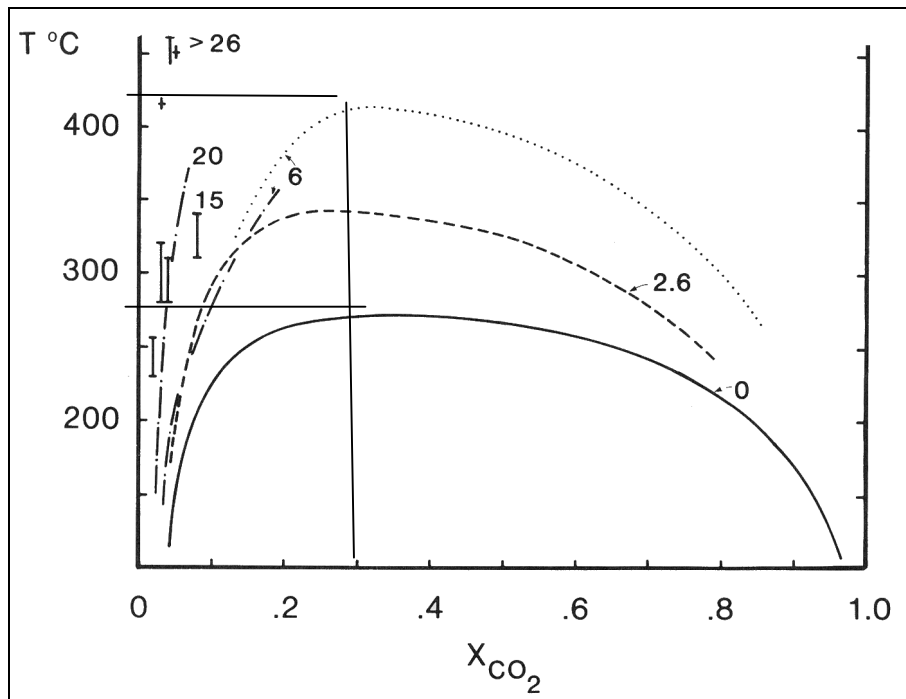


Figura 5-20 - Efeito do sal no solvus do sistema CO₂-H₂O
Adaptada de Hollister (1981)

Na figura Figura 5-21, observa-se que a isócora 0,77 g/cm³ indica uma pressão de confinamento de aproximadamente 2 Kbar, para a temperatura de 400°C.

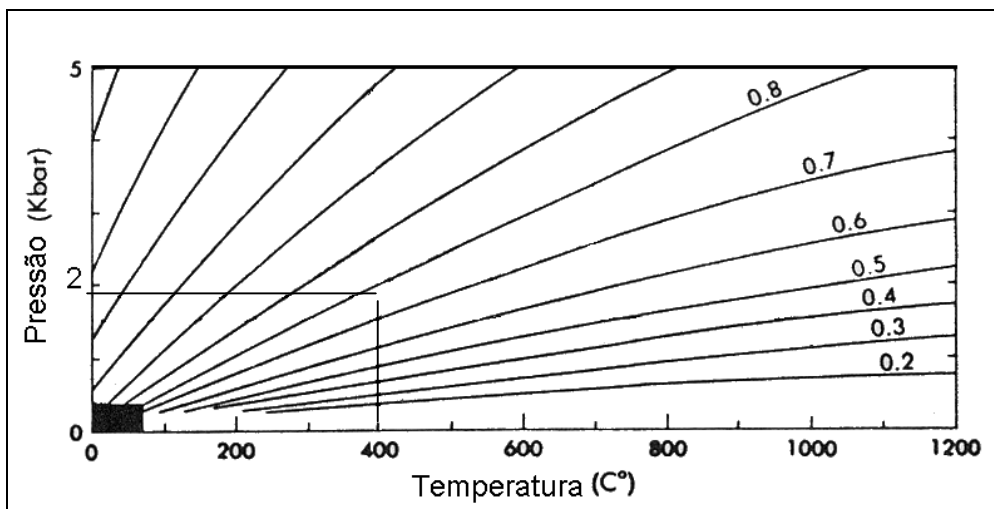


Figura 5-21 - Diagrama P-T para o sistema CO₂ na faixa de altas temperaturas.
Adaptada de Roedder (1984)

5.5 – ANÁLISES TÉRMICAS

As análises térmicas (TG, DTG, DTA, DDTA) foram realizadas em um analisador simultâneo Netzsch, modelo STA 409 C.

A observação dos termogramas obtidos mostra uma única fase termicamente reativa, que apresenta um pico endotérmico em $669\pm 12^{\circ}\text{C}$, correspondendo à magnesita (Hutchinson, 1974, p. 454). Algumas das amostras exibem um pequeno pico endotérmico em aproximadamente 830°C que, segundo Kulp et al. (1951), seria devido à presença de calcita. No entanto, os estudos difratométricos não indicam a presença de calcita e sim de dolomita. Prefere-se, assim, interpretar esse pequeno pico como demonstração da presença da dolomita. O primeiro pico da dolomita estaria mascarado sob o pico da magnesita.

Embora com presença garantida pelos estudos de microscopia óptica, não se pode confirmar a presença da hematita através desta técnica. A hematita não dá mudanças observáveis em DTA (McLaughlin, 1967, p. 419), ou só apresenta um pequeno pico endotérmico próximo de 680°C (Hutchinson, 1974, p. 455), ficando este mascarado pelo pico endotérmico predominante da magnesita na mesma região.

Talco apresentaria um pico endotérmico a cerca de 950°C a 1000°C (Hutchinson, 1974, p. 456), que não aparece nos termogramas. Como tem-se certeza da presença de talco, conforme se vê na Tabela 5-4, esta informação deixa duas possibilidades: ou a sensibilidade do método é insuficiente para a detecção do teor presente (da ordem de 1%), ou houve falta de representatividade na amostragem da alíquota analisada.

Nos termogramas de algumas amostras, observam-se oscilações na curva DTG, pequenos e sucessivos picos que indicam repentinas pequenas perdas/ganhos de massa (ver Figura 5-22, linha tracejada). De acordo com Dollimore et al. (1994) essas variações poderiam ser atribuídas a possível ejeção de material durante o aquecimento. Não encontrou-se explicação razoável para esse comportamento. Na Tabela 5-13 indica-se esse fenômeno na coluna Variações DTG. Na mesma tabela são apresentados os resultados da primeira e da segunda série de análises térmicas.

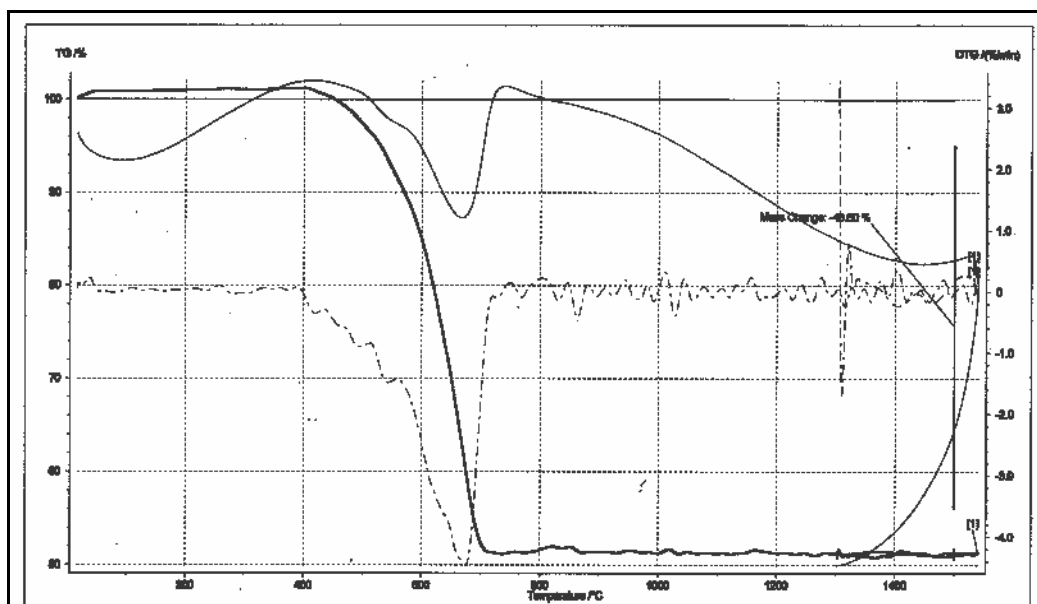


Figura 5-22 – Termograma TG e DTG para a amostra PP704-A

Tabela 5-13 – Resumo de análises termogravimétrica (TG) e termodiferencial

| Amostra | Perda de massa (%) | Pico Principal (°C) | Pico Dolomita | Oscilações DTG |
|-----------|--------------------|---------------------|---------------|----------------|
| TJ-A | 49,32 | 657,6 | Sim | Sim |
| TJ-B | 48,66 | 683,7 | Sim | Não |
| TJ-C | 48,92 | 677,2 | Sim | Sim |
| TP-A | 50,41 | 669,9 | Sim | Não |
| TP-B | 48,80 | 689,6 | Sim | Não |
| TPP-A | 49,56 | 651,1 | Não | Não |
| TPP-B | 49,62 | 667,9 | Não | Não |
| PP-704-A | 48,80 | 667,7 | Não | Sim |
| PP-704-B | 48,32 | 655,6 | Não | Sim |
| PP-RGF-A | 49,75 | 685,9 | Sim | Não |
| PP-RGF-B | 48,51 | 672,6 | Sim | Não |
| PP-BGF-A | 49,63 | 662,5 | Sim | Sim |
| PP-BGF-B | 50,30 | 655,6 | Sim | Sim |
| TJ-02 | 50,77 | 647,0 | Sim | Não |
| TJ-04 | 47,87 | 641,9 | Sim | Não |
| TP-06 | 50,06 | 633,5 | Sim | Não |
| TPP-01 | 50,49 | 627,0 | Não | Sim |
| PP-704-06 | 40,80 | 595,6 | Não | Não |
| PP-RGF-05 | 46,57 | 628,1 | Sim | Sim |
| PP-BGF | 46,57 | 631,1 | Sim | Sim |

5.6 – ESTUDO EM CATODOLUMINESCÊNCIA

Os estudos em catodoluminescência foram realizados em um equipamento da marca Technosyn, modelo 8200 MK II, do Departamento de Geociências da UFOP. Para o registro das imagens utilizou-se filme Fujicolor ASA 400.

Todas as amostras estudadas mostram intensa catodoluminescência em tons de vermelho, característica da magnesita (Figura 5-23). Em uma amostra, a TP, foram observadas vênulas de dolomita. Este último mineral exhibe catodoluminescência em tons de amarelo (Figura 5-23G e Figura 5-23H). O talco, a clorita e a hematita não exibiram catodoluminescência observável.

Assim é que, baseado nas imagens obtidas nas diversas amostras estudadas, observam-se pelo menos dois diferentes tipos de magnesita. Uma com manganês mais alto e outra com baixa concentração deste elemento. Em algumas amostras, pode-se observar até três tipos, incluindo-se entre os dois primeiros um outro com teor médio de manganês.

Em algumas amostras tem-se zonamento ritmado bastante visível ou bordas de sobrecrecimento nas quais a concentração de manganês varia. Este comportamento indica mudanças das condições físico-químicas que controlaram a relação Mn/Fe durante o crescimento dos cristais (ver Figura 5-24).

Bem evidente também é a magnesita de baixa concentração em manganês, preenchendo interstícios, e o soldamento de cristais cataclasados como se pode observar na Figura 5-23F. Este processo possivelmente representa uma possível última etapa de mineralização (ou remobilização), que envolveu a percolação da rocha por soluções magnésio-carbonatadas, pobres em manganês, que promoveram a consolidação nas regiões de fraturas.

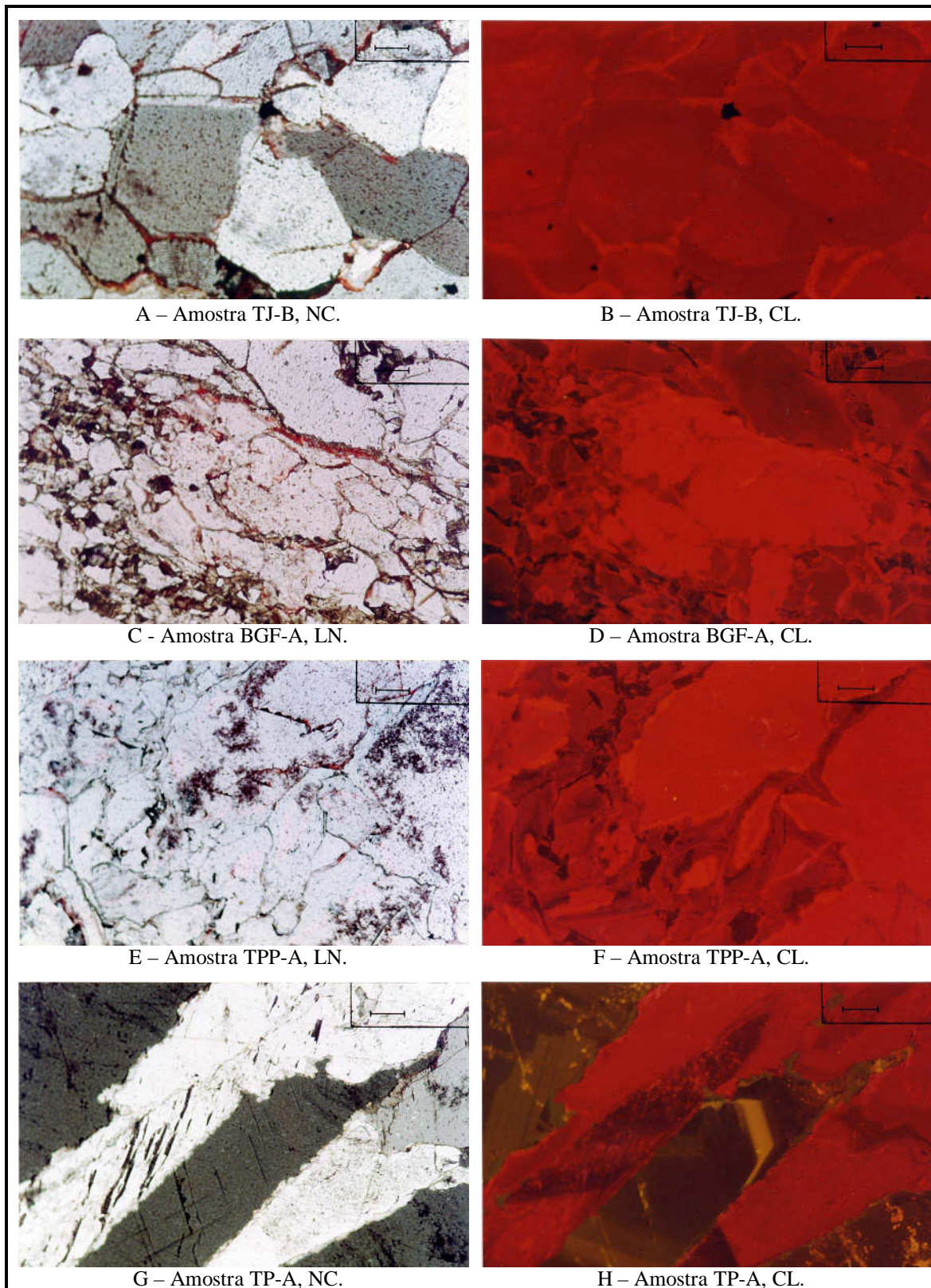


Figura 5-23 – Lâminas delgadas vistas em catodoluminescência. LN - Luz Natural (Plano Polarizada); NC - Nicóis Cruzados; CL – Catodoluminescência. Os diferentes tons de vermelho nas imagens B, D e F refletem as diferenças da relação Mn/Fe nas magnesitas. Na imagem H o mineral com CL em tons de marron-amarelado é a dolomita.

Escala gráfica = 330 μ m

No mapeamento de raios-X para ferro e manganês, feito por microsonda, em uma região da amostra TPP-A, onde se verifica forte zonamento evidenciado na intensidade da catodoluminescência, observa-se uma correlação positiva do teor de manganês com a intensidade da catodoluminescência (Figura 5-24). A escala de cores varia de azul a vermelho, sendo que o vermelho indica as maiores concentrações do elemento.

A Tabela 5-14 mostra os resultados de microanálises efetuadas nos pontos marcados na Figura 5-24B. Pode-se verificar através destas análises a variação do teor de manganês em mais de 200%, o que explicaria as diferenças de catodoluminescência na magnesita, confirmando, segundo Marshall (1988), o manganês como o ativador da catodoluminescência na magnesita.

Ainda na Tabela 5-14, verifica-se que, entre a magnesita de catodoluminescência mais intensa (clara) e a menos intensa (escura), há uma variação de mais de 400% na relação Mn/Fe que, em última instância, é quem governa a catodoluminescência na magnesita.

Tabela 5-14 – Microanálises efetuadas nas regiões marcadas na Figura 5-24B

| Região | MgO | MnO | CaO | Al₂O₃ | FeO | SiO₂ | CO₂ | Total | Mn/Fe | CL |
|---------------|------------|------------|------------|------------------------------------|------------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------|
| A | 46,52 | 0,10 | 0,04 | 0,00 | 0,45 | 0,02 | 52,88 | 100,00 | 0,23 | Escura |
| B | 45,82 | 0,18 | 0,03 | 0,00 | 0,71 | 0,02 | 53,23 | 100,00 | 0,26 | Média |
| C | 45,97 | 0,39 | 0,06 | 0,01 | 0,39 | 0,03 | 53,15 | 100,00 | 1,00 | Clara |

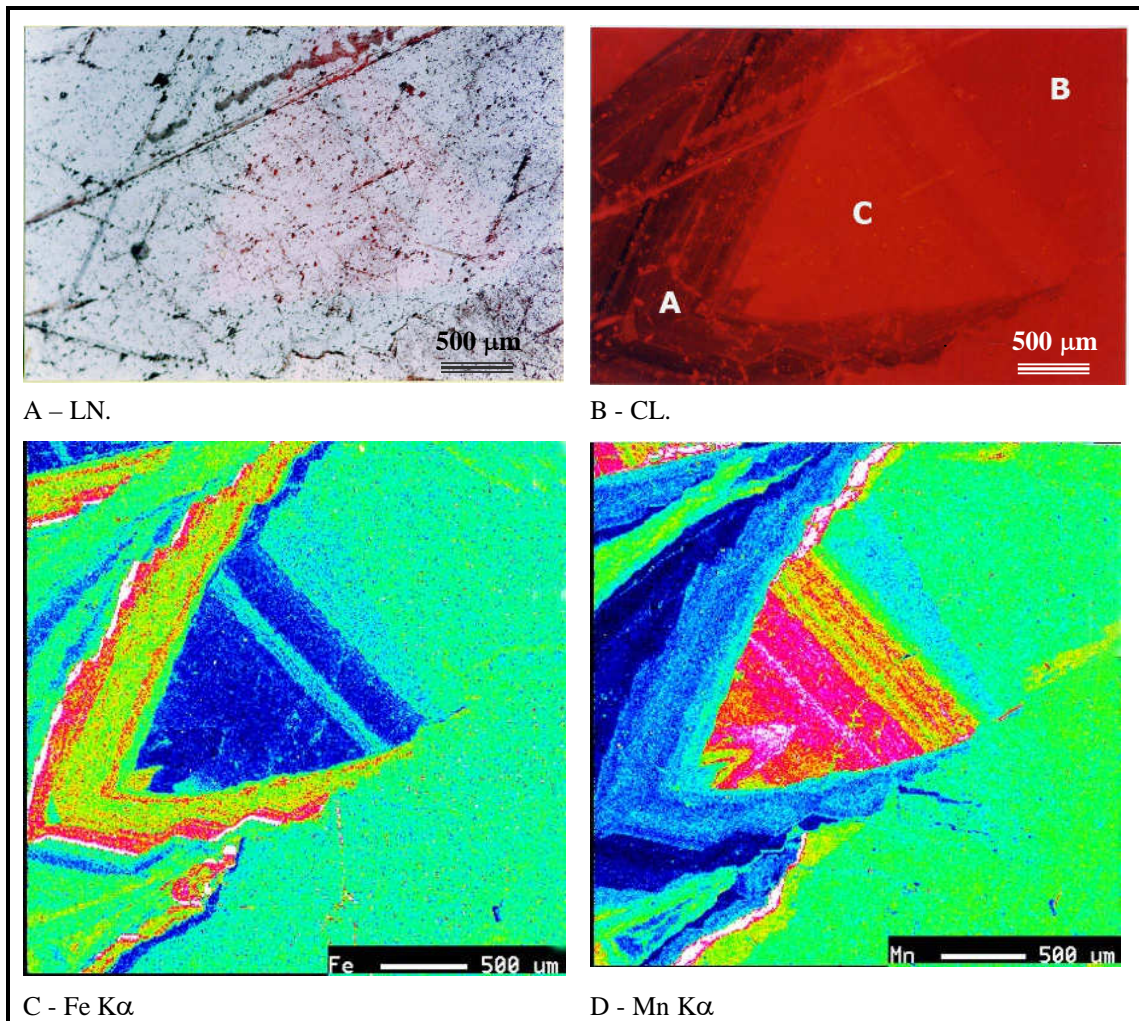


Figura 5-24 – Variação na distribuição de ferro e de manganês em um campo da amostra TPP-A. Observação da fluorescência de raios-X do Fe e do Mn, por excitação através de varredura da área sob estudo por um feixe de elétrons em microsonda eletrônica.

A imagem B é o mesmo campo observado em luz natural (plano polarizada) mostrado na imagem A. Observe-se que o zoneamento evidenciado pela CL acompanha linhas de crescimento do cristal de magnetita.

A coloração das imagens C e D enfatiza e evidencia as diferenças de concentração dos elementos analisados (Fe e Mn). O azul representa concentrações menores enquanto o vermelho representa concentrações maiores.

5.7 – ESTUDOS MICROANALÍTICOS

Estes estudos foram realizados com o intuito de se conhecer a composição química dos minerais constituintes dos minérios. Foram utilizadas as mesmas lâminas delgadas polidas que serviram para o estudo em microscopia óptica em luz polarizada e em catodoluminescência.

Estudaram-se em especial as diferentes variedades de magnesitas (vermelha, branca e incolor), o talco, os opacos, clorita e os acessórios.

As análises foram realizadas em uma microsonda JEOL, modelo JXA-8900, utilizando-se condições instrumentais rotineiramente empregadas para os minerais analisados (vide Capítulo 4).

5.7.1 – Análises de hematitas

Com exceção das amostras TJ, nas quais aparece hematita em cristais mais desenvolvidos e intergranulares em relação à magnesita, este mineral ocorre como uma fina poeira disseminada na magnesita denominada vermelha. A Tabela 5-15 traz a média, juntamente com o desvio padrão e o número de análises, para a hematita nas amostras que apresentaram este mineral. As microanálises foram feitas em partículas com diâmetro aparente de 10 μ m ou maior, para evitar excitação de fases vizinhas. A Figura 5-25 é o espectro de energia para este mineral.

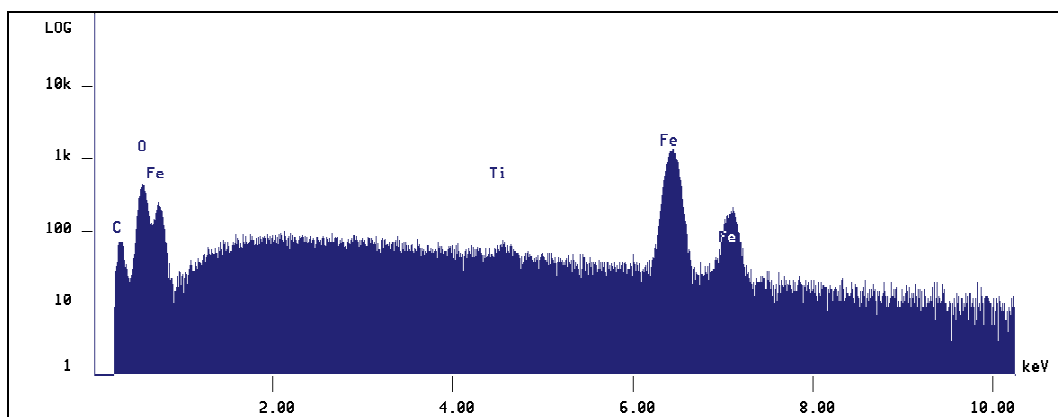


Figura 5-25 – Espectro de energia de hematita

Tabela 5-15 – Médias de análises em hematitas

| Amostra | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | MgO | MnO | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Total | Análises |
|---------|--------------------------------|------------------|-------------|-------------|------------------|--------------------------------|--------|----------|
| TJ | 0,27 | 0,02 | 0,15 | 0,02 | 0,47 | 99,20 | 100,14 | 18 |
| | <i>0,03</i> | <i>0,02</i> | <i>0,02</i> | <i>0,02</i> | <i>0,11</i> | <i>0,49</i> | | |
| TP | 0,15 | 0,03 | 0,50 | 0,03 | 1,26 | 97,49 | 99,46 | 3 |
| | <i>0,08</i> | <i>0,02</i> | <i>0,29</i> | <i>0,04</i> | <i>0,58</i> | <i>0,76</i> | | |
| TPP | 0,09 | 0,02 | 0,28 | 0,06 | 0,97 | 98,32 | 99,73 | 7 |
| | <i>0,05</i> | <i>0,02</i> | <i>0,26</i> | <i>0,03</i> | <i>0,93</i> | <i>1,26</i> | | |
| PP-704 | 0,11 | 0,02 | 0,14 | 0,03 | 0,91 | 98,68 | 99,88 | 17 |
| | <i>0,02</i> | <i>0,03</i> | <i>0,05</i> | <i>0,03</i> | <i>0,63</i> | <i>0,82</i> | | |
| PP-RGF | 0,06 | 0,02 | 0,24 | 0,04 | 1,13 | 98,71 | 100,19 | 3 |
| | <i>0,00</i> | <i>0,02</i> | <i>0,04</i> | <i>0,02</i> | <i>0,22</i> | <i>1,00</i> | | |

Fe total expresso como Fe₂O₃ (% ponderal); Valores em itálico = Desvio Padrão

Digna de menção, é a presença de titânio em concentração anormalmente alta, se comparada com hematitas de origem sedimentar química como as do Quadrilátero Ferrífero. Nos pontos onde se observou concentração de TiO₂ maior que 1%, verificou-se a presença de finas agulhas de rutilo.

5.7.2 – Análises de cloritas

As cloritas aparecem como palhetas curtas, perfeitamente incolores e exibindo birrefringência baixa. São essencialmente magnesianas, com um teor de ferro baixo, o que explica a ausência de coloração. As composições sugerem um clinocloro ou uma peninita. As médias das análises são exibidas na Tabela 5-16. Na Figura 5-26 tem-se o espectro de energia para este mineral.

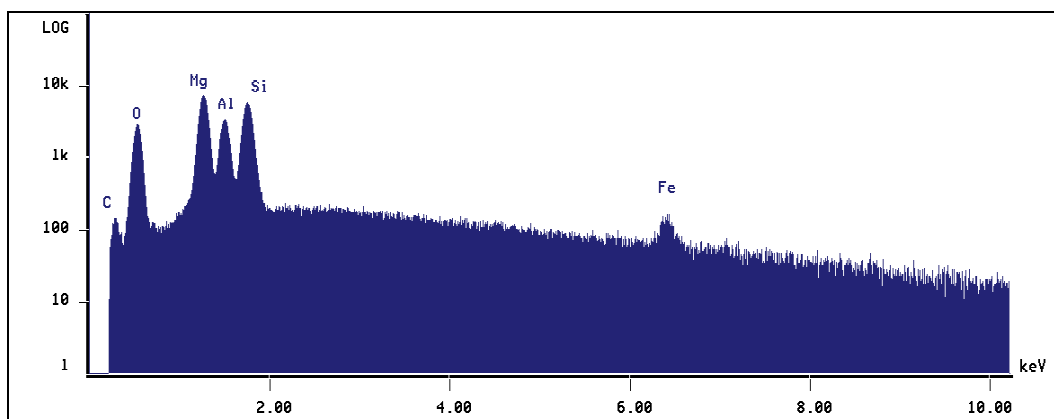


Figura 5-26 – Espectro de energia de clorita

Tabela 5-16 – Médias de análises em cloritas

| Amostra | MgO | MnO | CaO | Al ₂ O ₃ | FeO | SiO ₂ | H ₂ O | Total | Análises |
|---------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|-------------|------------------|------------------|--------|----------|
| TJ | 33,38 | 0,01 | 0,05 | 22,21 | 1,02 | 27,47 | 15,86 | 100,00 | 1 |
| | - | - | - | - | - | - | - | | |
| TP | 34,44 | 0,01 | 0,04 | 18,43 | 0,45 | 31,48 | 15,16 | 100,00 | 1 |
| | - | - | - | - | - | - | - | | |
| TPP | 35,17 | 0,03 | 0,01 | 17,80 | 1,14 | 28,65 | 17,21 | 100,00 | 10 |
| | <i>0,27</i> | <i>0,01</i> | <i>0,01</i> | <i>0,35</i> | <i>0,20</i> | <i>0,69</i> | <i>0,80</i> | | |
| PP-704 | 33,74 | 0,03 | 0,03 | 19,17 | 1,30 | 29,27 | 16,47 | 100,00 | 7 |
| | <i>1,42</i> | <i>0,02</i> | <i>0,03</i> | <i>1,08</i> | <i>0,17</i> | <i>0,92</i> | <i>2,90</i> | | |
| PP-RGF | 35,17 | 0,02 | 0,03 | 16,42 | 1,69 | 31,13 | 15,55 | 100,00 | 8 |
| | <i>0,71</i> | <i>0,01</i> | <i>0,02</i> | <i>1,00</i> | <i>0,24</i> | <i>1,16</i> | <i>1,12</i> | | |

Fe total expresso como FeO; H₂O calculado por diferença; Valores em itálico = Desvio Padrão

5.7.3 – Análises de talco

Talco aparece como palhetas, isoladas ou em aglomerados, normalmente intergranulares. Maiores concentrações acontecem, comumente, como venulações ou em áreas de cisalhamento. As médias das análises, juntamente com o desvio padrão e o número de análises, são mostradas na. A Figura 5-27 mostra o espectro de energia deste mineral.

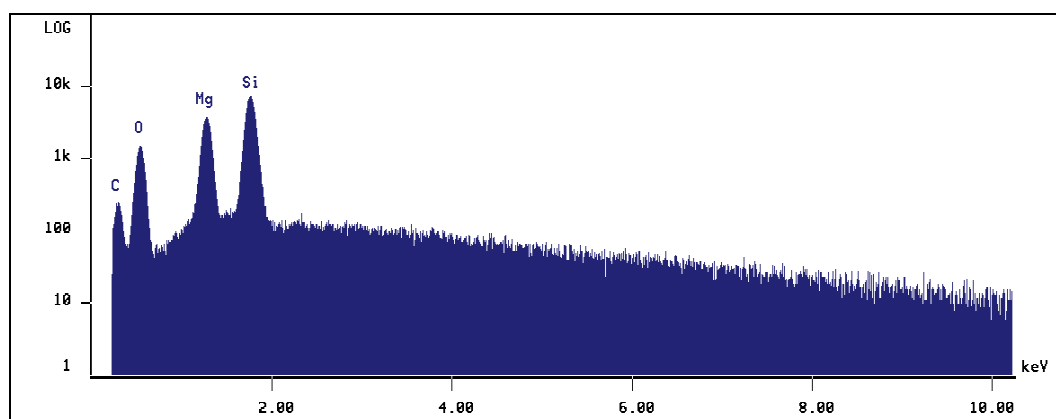


Figura 5-27 – Espectro de energia do talco

Tabela 5-17 – Médias de análises em talco

| Amostra | MgO | MnO | CaO | Al ₂ O ₃ | FeO | SiO ₂ | H ₂ O | Total | Análises |
|---------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|-------------|------------------|------------------|--------|----------|
| TJ | 32,11 | 0,01 | 0,03 | 0,27 | 0,08 | 62,21 | 5,30 | 100,00 | 13 |
| | <i>0,40</i> | <i>0,01</i> | <i>0,02</i> | <i>0,27</i> | <i>0,04</i> | <i>0,60</i> | <i>0,86</i> | | |
| TP | 32,38 | 0,00 | 0,04 | 0,29 | 0,05 | 62,17 | 5,06 | 100,00 | 7 |
| | <i>0,37</i> | <i>0,01</i> | <i>0,02</i> | <i>0,09</i> | <i>0,01</i> | <i>0,93</i> | <i>0,84</i> | | |
| PP-704 | 32,67 | 0,01 | 0,03 | 0,43 | 0,09 | 62,78 | 3,99 | 100,00 | 3 |
| | <i>0,26</i> | <i>0,01</i> | <i>0,03</i> | <i>0,14</i> | <i>0,03</i> | <i>0,07</i> | <i>0,29</i> | | |
| PP-RGF | 32,38 | 0,01 | 0,02 | 0,10 | 0,08 | 62,65 | 4,76 | 100,00 | 5 |
| | <i>0,60</i> | <i>0,01</i> | <i>0,01</i> | <i>0,04</i> | <i>0,02</i> | <i>0,31</i> | <i>0,87</i> | | |
| PP-BGF | 32,61 | 0,01 | 0,03 | 0,21 | 0,06 | 63,21 | 3,86 | 100,00 | 17 |
| | <i>0,34</i> | <i>0,01</i> | <i>0,02</i> | <i>0,05</i> | <i>0,01</i> | <i>0,62</i> | <i>0,88</i> | | |

Fe total expresso como FeO; H₂O calculado por diferença; Valores em *itálico* = Desvio Padrão

5.7.4 – Análises de dolomita

A dolomita aparece como inclusões tipo globulares na magnesita e com tamanho muito pequeno. Normalmente não excede 10µm. Também pode aparecer em vênulas, como é o caso da amostra TP. Nas microanálises, o teor ligeiramente mais elevado em Mg e proporcionalmente diminuído em Ca pode ser devido ao pequeno tamanho das partículas e conseqüente excitação da magnesita vizinha. A Tabela 5-18 mostra as médias, juntamente com o desvio padrão para as análises feitas nesse mineral em diferentes amostras. Na Figura 5-28 mostra-se o espectro de energia para este mineral.

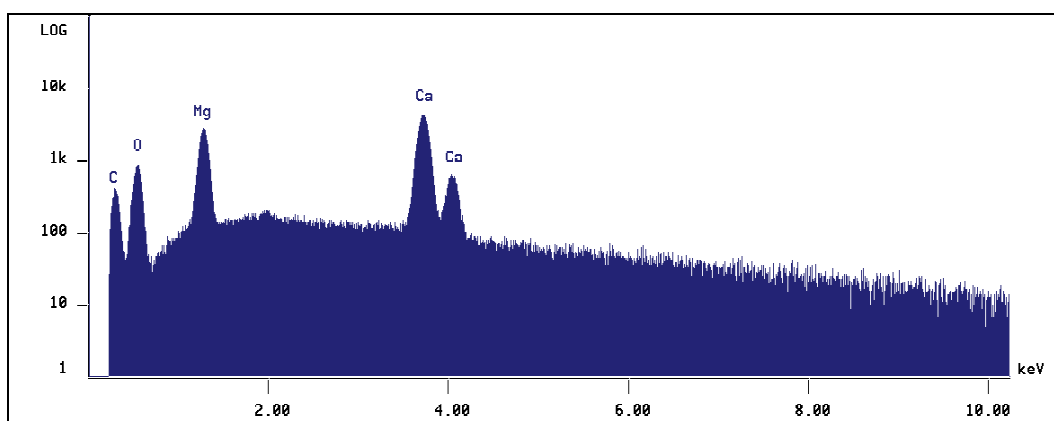


Figura 5-28 – Espectro de energia de dolomita

Tabela 5-18 – Médias de análises em dolomita

| Amostra | MgO | MnO | CaO | Al₂O₃ | FeO | SiO₂ | CO₂ | Total | Análises |
|----------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| TJ | 22,37 | 0,03 | 30,84 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 46,72 | 100,00 | 8 |
| | <i>0,36</i> | <i>0,00</i> | <i>0,34</i> | <i>0,00</i> | <i>0,04</i> | <i>0,01</i> | <i>0,61</i> | | |
| TP | 22,40 | 0,02 | 30,48 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 47,05 | 100,00 | 6 |
| | <i>0,38</i> | <i>0,02</i> | <i>0,63</i> | <i>0,00</i> | <i>0,03</i> | <i>0,01</i> | <i>0,94</i> | | |
| TPP | 22,29 | 0,69 | 30,10 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 46,90 | 100,00 | 1 |
| | - | - | - | - | - | - | - | | |
| PP-704 | 22,34 | 0,10 | 30,58 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 46,91 | 100,00 | 2 |
| | <i>0,50</i> | <i>0,01</i> | <i>0,16</i> | <i>0,01</i> | <i>0,01</i> | <i>0,02</i> | <i>0,29</i> | | |
| PP-RGF | 22,35 | 0,02 | 31,16 | 0,01 | 0,09 | 0,00 | 46,37 | 100,00 | 3 |
| | <i>0,36</i> | <i>0,02</i> | <i>0,69</i> | <i>0,01</i> | <i>0,03</i> | <i>0,00</i> | <i>1,06</i> | | |

Fe total expresso como FeO; CO₂ calculado por diferença; Valores em itálico = Desvio Padrão

5.7.5 – Minerais acessórios

Em concentrações reduzidas, a nível de traços, foram encontrados alguns minerais acessórios identificados através de microanálise qualitativa por EDS. Assim é que foram caracterizados zirconita, apatita, monazita, rutilo e possível derbylita. Da Figura 5-29 à Figura 5-33 são mostrados os espectros de energia desses minerais. O tamanho muito pequeno das partículas, normalmente abaixo de 10µm, dificulta a obtenção de análises quantitativas fidedignas, uma vez que ocorre também a excitação de raios-X do mineral hospedeiro.

A possível derbylita foi encontrada na amostra TP-A. Apatita rica em cloro ocorre na amostra TJ-A. Monazita, com U e Th, foi identificada na amostra TPP-A, enquanto zirconita foi encontrada na amostra TPP-B. Rutilo é comum em todas as amostras.

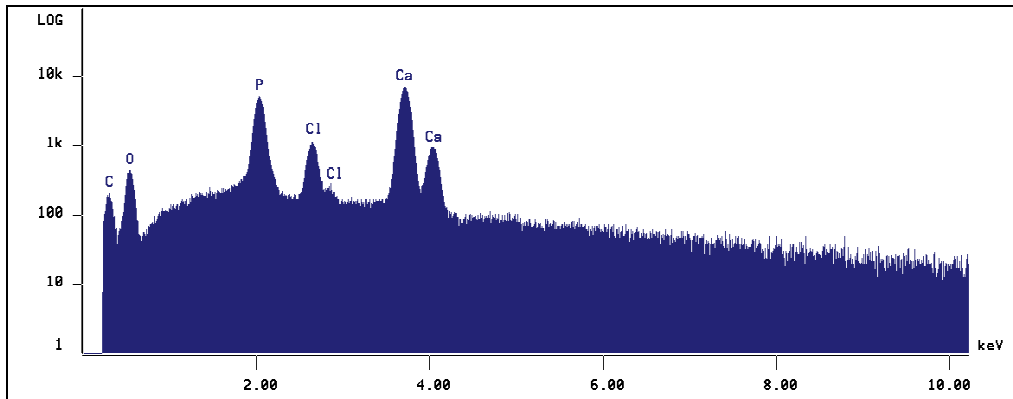


Figura 5-29 – Espectro de energia de apatita rica em cloro

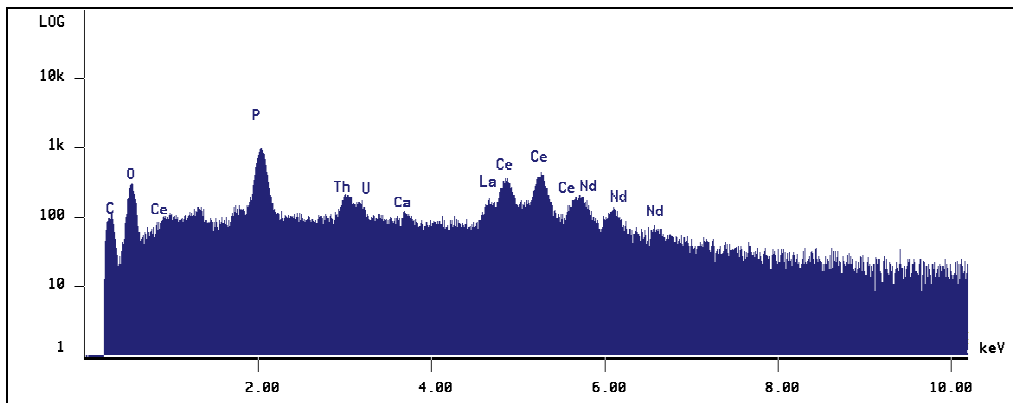


Figura 5-30 – Espectro de energia da monazita

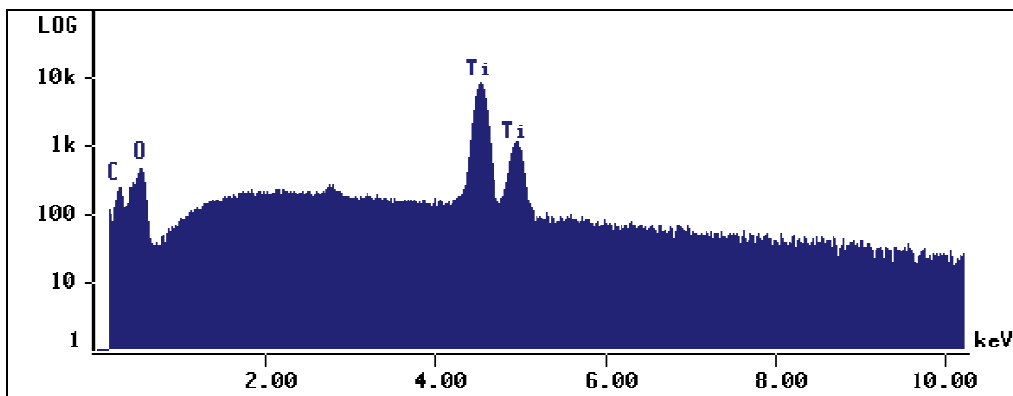


Figura 5-31 – Espectro de energia do rutilo

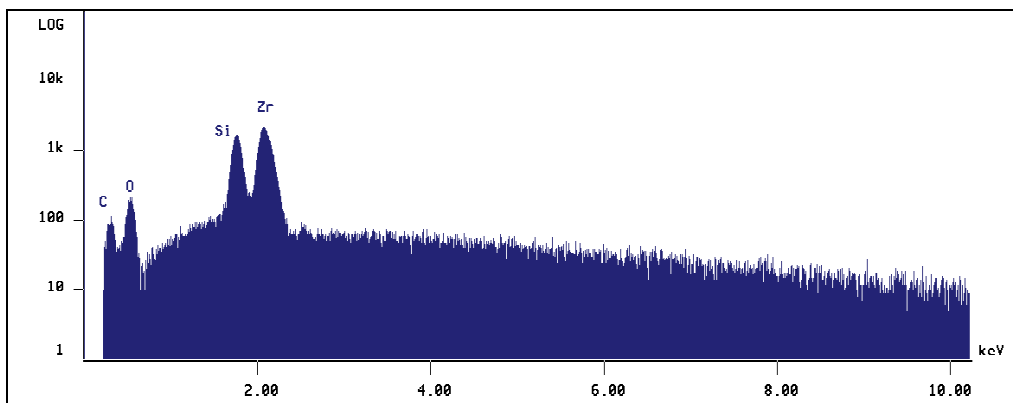


Figura 5-32 – Espectro de energia da zirconita

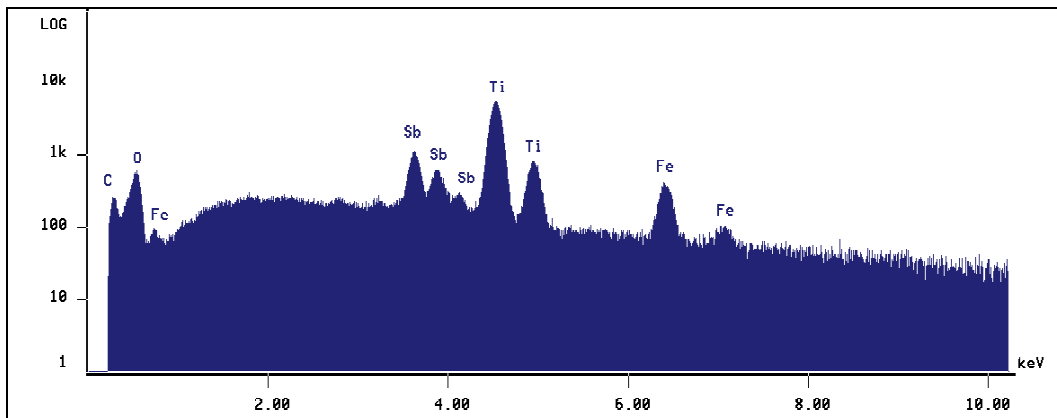


Figura 5-33 – Espectro de energia da derbylita?

5.7.6 – Análises das magnesitas

Por se tratar do mineral predominante e de principal interesse, a magnesita foi estudada mais em detalhe. Seguindo-se a distinção que se observa visualmente, conforme já explicado no estudo em microscopia óptica, as magnesitas foram separadas em: vermelha, branca e incolor. Os resultados das análises nestes três tipos básicos são apresentados em Tabela 5-19, Tabela 5-20 e Tabela 5-21. A Figura 5-34 mostra o espectro de energia para este mineral.

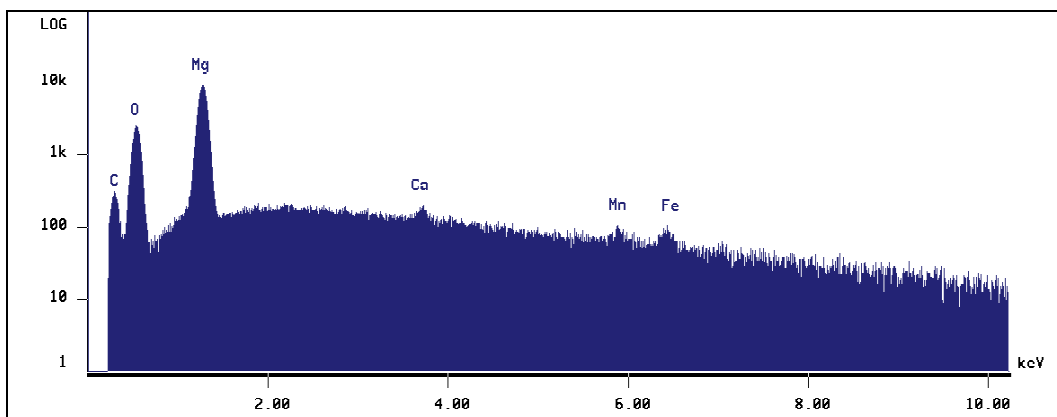


Figura 5-34 – Espectro de energia da magnesita

Tabela 5-19 – Médias de análises em magnesitas brancas

| Amostra | MgO | MnO | CaO | Al₂O₃ | FeO | SiO₂ | CO₂ | Total | Análises |
|----------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| TJ | 46,62 | 0,06 | 0,20 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 53,03 | 100,00 | 14 |
| | <i>0,32</i> | <i>0,02</i> | <i>0,06</i> | <i>0,00</i> | <i>0,03</i> | <i>0,01</i> | <i>0,32</i> | | |
| TP | 47,05 | 0,05 | 0,19 | 0,00 | 0,07 | 0,01 | 52,62 | 100,00 | 1 |
| | - | - | - | - | - | - | - | | |
| TPP | 46,13 | 0,47 | 0,15 | 0,00 | 0,31 | 0,01 | 52,93 | 100,00 | 8 |
| | <i>0,16</i> | <i>0,09</i> | <i>0,10</i> | <i>0,00</i> | <i>0,06</i> | <i>0,00</i> | <i>0,15</i> | | |
| PP-704 | 46,20 | 0,38 | 0,18 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 53,18 | 100,00 | 6 |
| | <i>1,15</i> | <i>0,04</i> | <i>0,09</i> | <i>0,00</i> | <i>0,05</i> | <i>0,00</i> | <i>1,11</i> | | |
| PP-RGF | 46,57 | 0,13 | 0,24 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 52,84 | 100,00 | 2 |
| | <i>0,09</i> | <i>0,02</i> | <i>0,01</i> | <i>0,00</i> | <i>0,03</i> | <i>0,00</i> | <i>0,04</i> | | |
| PP-BGF | 46,80 | 0,07 | 0,20 | 0,00 | 0,19 | 0,01 | 52,74 | 100,00 | 5 |
| | <i>0,28</i> | <i>0,02</i> | <i>0,01</i> | <i>0,00</i> | <i>0,01</i> | <i>0,01</i> | <i>0,27</i> | | |

Fe total expresso como FeO; CO₂ calculado por diferença; Valores em itálico = Desvio Padrão

Tabela 5-20 – Médias de análises em magnesitas incolores

| Amostra | MgO | MnO | CaO | Al₂O₃ | FeO | SiO₂ | CO₂ | Total | Análises |
|----------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| TJ | 46,66 | 0,08 | 0,20 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 53,01 | 100,00 | 2 |
| | <i>0,16</i> | <i>0,01</i> | <i>0,08</i> | <i>0,00</i> | <i>0,00</i> | <i>0,00</i> | <i>0,06</i> | | |
| TP | 46,78 | 0,04 | 0,20 | 0,00 | 0,15 | 0,01 | 52,81 | 100,00 | 10 |
| | <i>0,40</i> | <i>0,01</i> | <i>0,06</i> | <i>0,00</i> | <i>0,05</i> | <i>0,00</i> | <i>0,41</i> | | |
| TPP | 46,21 | 0,44 | 0,18 | 0,00 | 0,48 | 0,01 | 52,66 | 100,00 | 6 |
| | <i>0,46</i> | <i>0,07</i> | <i>0,04</i> | <i>0,00</i> | <i>0,18</i> | <i>0,01</i> | <i>0,32</i> | | |
| PP-704 | 46,39 | 0,37 | 0,24 | 0,00 | 0,10 | 0,01 | 52,89 | 100,00 | 8 |
| | <i>0,46</i> | <i>0,04</i> | <i>0,05</i> | <i>0,00</i> | <i>0,05</i> | <i>0,01</i> | <i>0,42</i> | | |
| PP-RGF | 46,51 | 0,16 | 0,21 | 0,01 | 0,22 | 0,01 | 52,88 | 100,00 | 6 |
| | <i>0,54</i> | <i>0,05</i> | <i>0,05</i> | <i>0,01</i> | <i>0,03</i> | <i>0,02</i> | <i>0,46</i> | | |
| PP-BGF | 46,84 | 0,06 | 0,20 | 0,00 | 0,17 | 0,01 | 52,70 | 100,00 | 3 |
| | <i>0,02</i> | <i>0,01</i> | <i>0,01</i> | <i>0,00</i> | <i>0,02</i> | <i>0,01</i> | <i>0,05</i> | | |

Fe total expresso como FeO; CO₂ calculado por diferença; Valores em itálico = Desvio Padrão

Tabela 5-21 – Médias de análises em magnesitas vermelhas

| Amostra | MgO | MnO | CaO | Al₂O₃ | FeO | SiO₂ | CO₂ | Total | Análises |
|----------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| TJ | 46,61 | 0,09 | 0,21 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 53,00 | 100,00 | 4 |
| | <i>0,24</i> | <i>0,01</i> | <i>0,03</i> | <i>0,00</i> | <i>0,03</i> | <i>0,01</i> | <i>0,26</i> | | |
| TP | 46,80 | 0,05 | 0,23 | 0,00 | 0,15 | 0,01 | 52,76 | 100,00 | 5 |
| | <i>0,28</i> | <i>0,01</i> | <i>0,06</i> | <i>0,00</i> | <i>0,10</i> | <i>0,01</i> | <i>0,18</i> | | |
| TPP | 46,15 | 0,46 | 0,19 | 0,01 | 0,31 | 0,01 | 52,87 | 100,00 | 11 |
| | <i>0,40</i> | <i>0,14</i> | <i>0,12</i> | <i>0,01</i> | <i>0,10</i> | <i>0,01</i> | <i>0,43</i> | | |
| PP-704 | 46,37 | 0,40 | 0,19 | 0,01 | 0,16 | 0,01 | 52,86 | 100,00 | 7 |
| | <i>0,44</i> | <i>0,08</i> | <i>0,07</i> | <i>0,03</i> | <i>0,21</i> | <i>0,01</i> | <i>0,48</i> | | |
| PP-RGF | 46,64 | 0,34 | 0,15 | 0,01 | 0,12 | 0,02 | 52,72 | 100,00 | 13 |
| | <i>0,57</i> | <i>0,22</i> | <i>0,09</i> | <i>0,03</i> | <i>0,10</i> | <i>0,02</i> | <i>0,50</i> | | |
| PP-BGF | 46,96 | 0,04 | 0,14 | 0,00 | 0,18 | 0,01 | 52,67 | 100,00 | 1 |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | |

Fe total expresso como FeO; CO₂ calculado por diferença; Valores em itálico = Desvio Padrão

Análise estatística dos resultados das microanálises nas magnesitas das amostras estudadas (de modo global) permite uma separação em sub-populações com respeito ao teor de MnO encontrado. A Figura 5-35 mostra as médias das sub-populações juntamente com o intervalo de confiança para 95%, correlacionadas ao comportamento na queima.

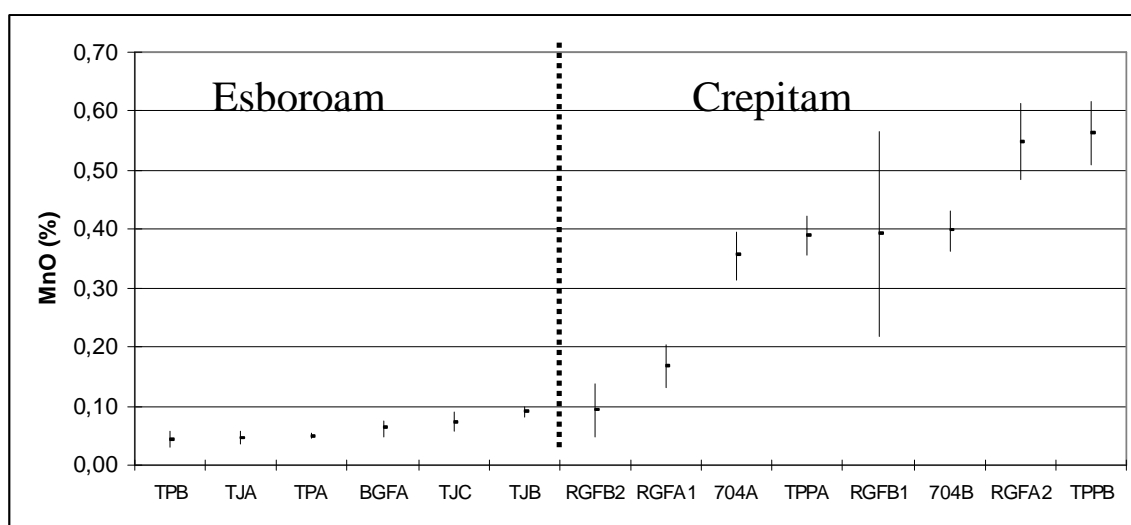


Figura 5-35 – Média dos teores de MnO nas magnesitas, com os respectivos intervalos de confiança para 95%.

A mesma figura mostra a separação das amostras em dois grupos: baixo manganês (amostras TP, TJ e BGF) e alto manganês (704 e TPPA). A amostra RGF apresenta, simultaneamente, magnesitas com baixo e alto manganês mas tem comportamento aceitável na queima. Pode-se estabelecer o teor de 0,20% como o limiar entre os dois grupos.

O mesmo teste é mostrado nas figuras X-Yb e X-Yc para os teores de CaO e FeO.

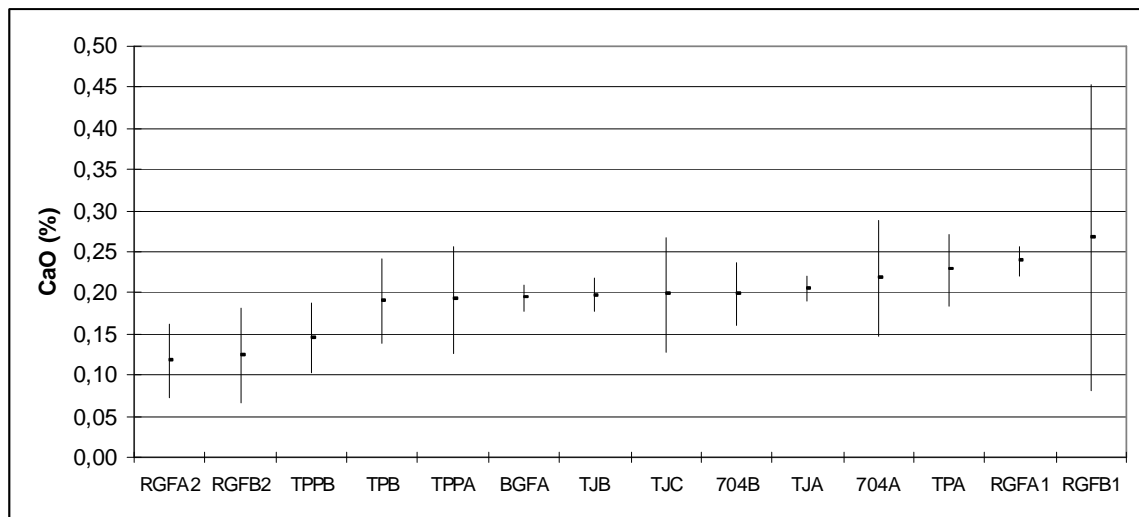


Figura 5-36 – Média dos teores de CaO nas magnesitas com os respectivos intervalos de confiança para 95%.

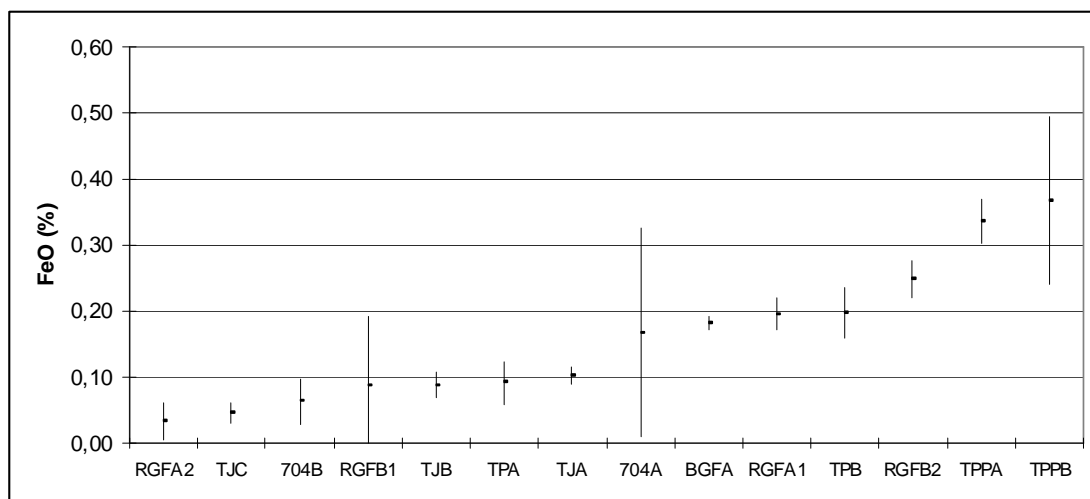


Figura 5-37 – Média dos teores de FeO nas magnesitas com os respectivos intervalos de confiança para 95%.

Aspectos interessantes são a considerar são:

- 1) a maior homogeneidade das amostras com baixo manganês, que apresentam menor variância para todos os três elementos analisados,
- 2) a heterogeneidade da amostra RGF,
- 3) a relativa constância da concentração de CaO em todas as amostras,
- 4) a correlação entre o alto teor de manganês com o melhor comportamento das amostras na queima e
- 5) a aparente não correlação da concentração de FeTotal (expresso como FeO) e do CaO com o comportamento das amostras na queima.

5.8 – TESTES DE QUEIMA

Para verificar como se comportavam, amostras selecionadas foram submetidas a teste de queima, simulando parcialmente o processo industrial de monoqueima. Os testes foram realizados em fornos elétricos do CPqD da Magnesita S.A. O procedimento do teste é apresentado a seguir.

Fragmentos com aproximadamente 250g foram queimados em um forno elétrico a 1000°C por duas horas (após pré-aquecimento segundo o esquema de aquecimento mostrado na Tabela 5-22) e depois deixados resfriar até a temperatura ambiente.

Tabela 5-22 – Esquema de aquecimento nos testes de queima

| Intervalo de tempo | Temperatura (°C) |
|---------------------------|---|
| 0 - 1 minuto | 25 |
| 1 minuto - 2 horas | 425 |
| 2 - 6 horas | 1000 |
| 6 - 8 horas | manter 1000 |
| 8 horas - | desligar e deixar resfriar até a temperatura ambiente |

5.8.1 – Primeiro ciclo de testes de queima

Inicialmente foi feito um teste com as amostras selecionadas para serem estudadas em detalhe em todas as técnicas disponíveis. Foram usados 13 fragmentos.

Após as amostras terem sido desenformadas, a sua inspeção mostrou que duas das amostras ficaram completamente desagregadas, numa granulometria de areia. Sete outras mostravam-se trincadas, mas aparentemente coerentes. No entanto, a um simples toque ou vibração se desagregavam. Houvessem suportado alguma carga teriam também se desagregado totalmente (esboroados). Uma amostra se reduziu a fragmentos menores, porém bastante coerentes, e com pequena porção totalmente desagregada. Finalmente três amostras permaneceram íntegras e bastante coerentes. Verificou-se, pois, que 75% das amostras tiveram uma decrepitação de 100%.

Estudando-se o material desagregado em um microscópio estereoscópico, observou-se que o produto de desagregação das amostras apresentava características diferentes no tocante à forma das partículas.

Em algumas amostras, a desagregação se deu predominantemente por fragmentação do cristal original de magnesita, ao longo dos planos de clivagem. Em outras, a desagregação se deu predominantemente ao longo dos limites do cristal/grão neo-formado de periclásio. Para o primeiro caso, utilizar-se-á o termo “desagregação intragranular”, enquanto para o segundo será utilizado o termo “desagregação intergranular”. Acredita-se que, no primeiro caso, a decrepitação se deu antes da dissociação da magnesita. No segundo caso, a decrepitação ter-se-ia dado após a dissociação. Esta afirmação é baseada no fato de que após a dissociação da magnesita e a nucleação dos cristaltos, o produto resultante tem as características físicas completamente diferentes das do material original.

Em ambos os tipos de desagregação, a forma e tamanho dos fragmentos/cristais não têm nada a ver com a forma e tamanho dos cristais originais do carbonato.

A Tabela 5-23 identifica as amostras e indica o resultado da queima (com relação à desagregação) e o modo da desagregação.

Tabela 5-23 – Resultado do primeiro ciclo de testes de queima.

| Amostra | Resultado queima | Modo de desagregação |
|----------|-------------------------------------|----------------------|
| TJ-A | Esboroa mantendo aparente coerência | Intragranular |
| TJ-B | Esboroa mantendo aparente coerência | Intragranular |
| TJ-C | Esboroa mantendo aparente coerência | Intragranular |
| TP-A | Esboroa mantendo aparente coerência | Intragranular |
| TP-B | Esboroa mantendo aparente coerência | Intragranular |
| TPP-A | Não crepita | - |
| TPP-B | Crepita | * |
| PP-704-A | Esboroa mantendo aparente coerência | Intergranular |
| PP-704-B | Esboroa mantendo aparente coerência | Intergranular |
| PP-RGF-A | Não crepita | - |
| PP-RGF-B | Não crepita | - |
| PP-BGF-A | Esboroa muito | Intergranular |
| PP-BGF-B | Esboroa muito | Intergranular |

* : a fração fina mostra características de desagregação intragranular.

A determinação da perda ao fogo (PF) do material calcinado, após a queima, indicou os resultados mostrados na Tabela 5-24.

Tabela 5-24 – Perda ao fogo (PF) após queima por 2h a 1000°C.

| Amostra | P.F. (%) |
|----------------|-----------------|
| TJ-A | 4,80 |
| TJ-B | 1,60 |
| TJ-C | 2,26 |
| TP-A | 5,26 |
| TP-B | 1,22 |
| TPP-A | 0,53 |
| TPP-B | 0,46 |
| PP-704-A | 0,97 |
| PP-704-B | 0,49 |
| PP-RGF-A | 0,96 |
| PP-RGF-B | 0,78 |
| PP-BGR-A | 2,20 |
| PP-BGF-B | 1,61 |

Como não se efetuou a calcinação à morte das amostras, a perda ao fogo observada é, provavelmente, devida a recarbonatação e umidade adsorvida após a queima.

Os operadores do forno usam os termos esboroar e crepitar para indicar diferentes comportamentos da amostra sob queima. Dizem que a amostra crepita quando ela se divide em fragmentos menores porém coerentes (resistentes), com pequena fração fina. Dizem que a amostra esbroa quando ela se desagrega completamente em uma fração de granulometria areia grossa a fina.

Utilizando elétron-micrografias mostram-se (Figura 5-38 e Figura 5-39), as duas maneiras de desagregação da magnesita por efeito da decrepitação que ocorre durante a queima.

As elétron-micrografias da Figura 5-38 mostram o que foi denominado de desagregação intragranular, onde o periclásio pseudomorfosea a magnesita, deixando ainda visível a clivagem romboédrica do carbonato.

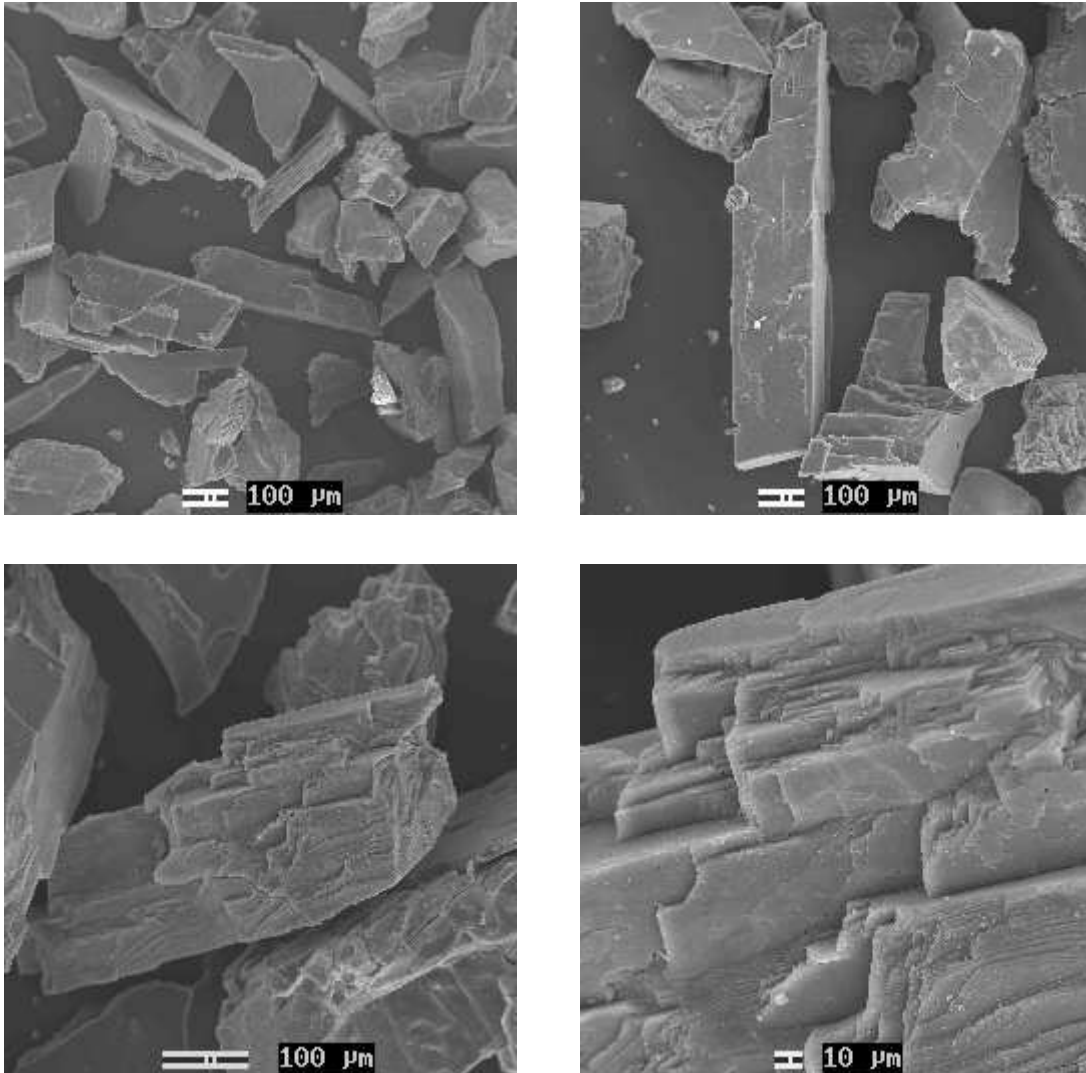


Figura 5-38 – Elétron-micrografias da amostra TJ-A, após a queima, mostrando a desagregação intragranular. Imagens de elétrons secundários.

Já na Figura 5-39, temos cristais, aproximadamente equidimensionais, de periclásio, que não guardam nenhum relicto do mineral de origem. A este segundo tipo de desagregação denomina-se intergranular, pois a separação se dá ao longo dos limites dos grãos da fase neo-formada. Nestes casos, os contatos entre os cristais é do tipo planar, sem indentações.

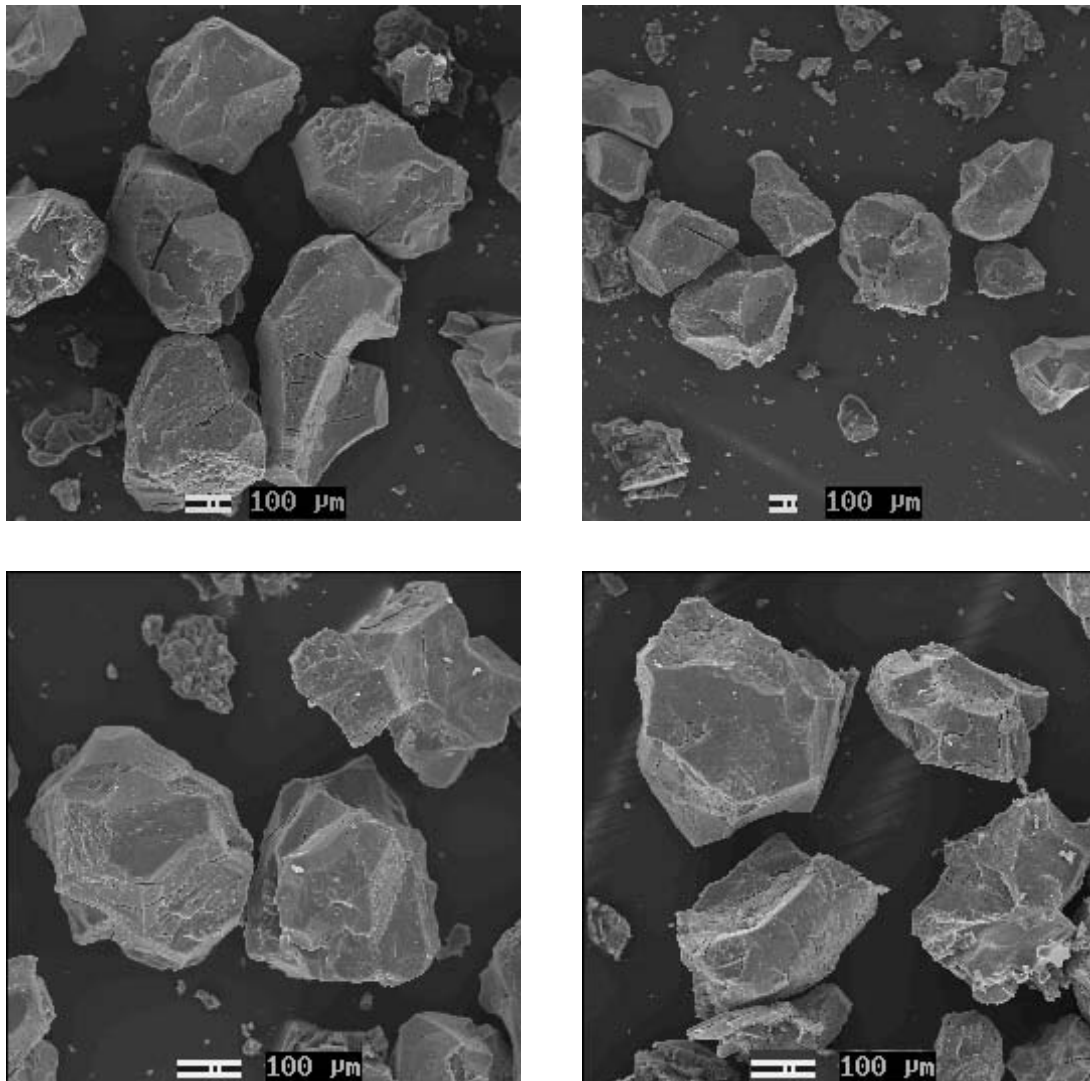


Figura 5-39 – Elétron-micrografias das amostras TPP-A (linha superior) e TP-B (linha inferior), após a queima, mostrando a desagregação intergranular. Imagens de elétrons secundários.

5.8.2 – Segundo ciclo de testes de queima

Para verificar a reprodutibilidade do comportamento do material em relação à queima, novos testes foram realizados, utilizando-se desta feita 10 fragmentos de cada amostra inicial.

Da mesma forma que no teste anterior, os novos testes foram realizados em fornos elétricos, usando o mesmo esquema de aquecimento já referido anteriormente.

Devido ao grande número de fragmentos foram necessárias duas bateladas para efetuar a queima de todas as amostras. A primeira consistiu das amostras TP, TJ e TPP. Na segunda batelada, foram processadas as amostras PP-704, PP-BGF e

PP-RGF. Para efeito de registro, foram feitas fotografias das amostras colocadas no forno, antes e depois da queima.

Na Figura 5-40 mostra-se, para a primeira batelada, o mapa da disposição das amostras dentro do forno.

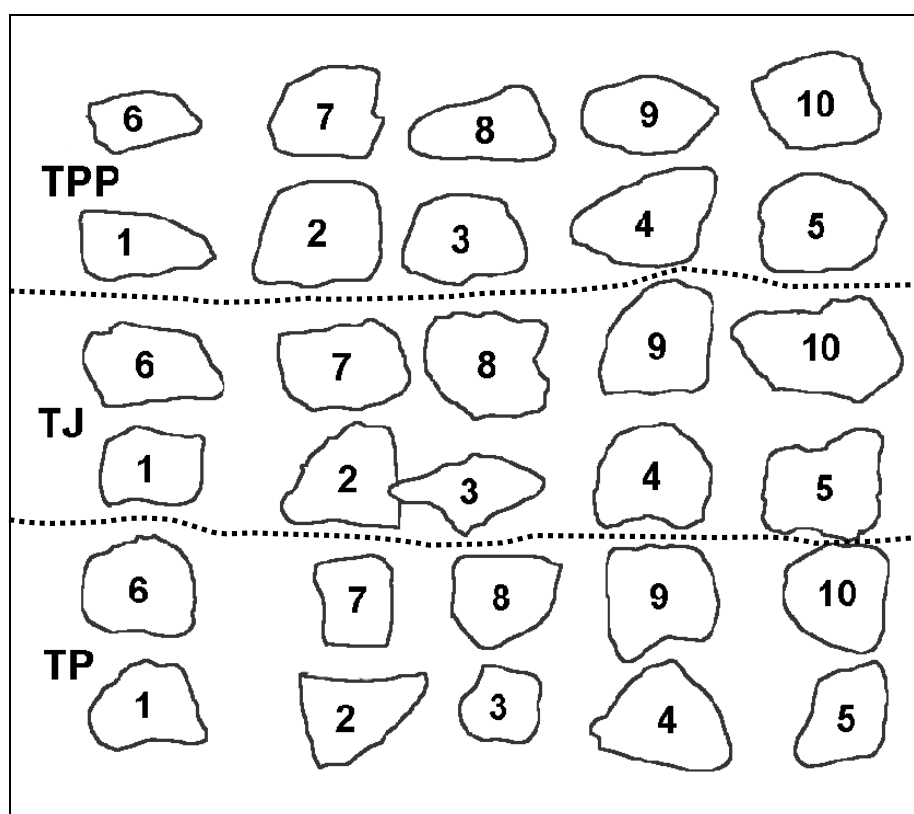


Figura 5-40 – Mapa índice das amostras na primeira batelada de queima.

A Figura 5-41 e a Figura 5-42 mostram a situação das amostras da primeira batelada, antes e depois da queima.

A Figura 5-43 mostra o mapa da disposição das amostras da segunda batelada dentro do forno. A Figura 5-44 ilustra a situação das amostras antes e depois da queima.



Figura 5-41 – Situação das amostras da primeira batelada antes da queima.



Figura 5-42 – Situação das amostras da primeira batelada depois da queima.

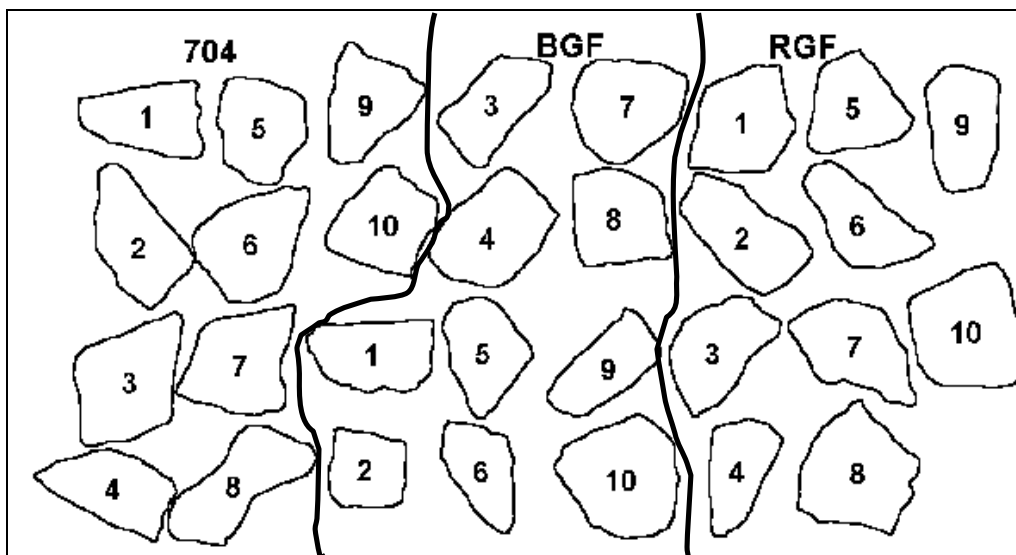


Figura 5-43 – Mapa índice das amostras na segunda batelada de queima.



Figura 5-44 – Situação das amostras da segunda batelada antes (acima) e depois da queima (abaixo).

Digno de menção e que pode ser observado nessas fotos, é que não ocorreu nenhuma redução do volume aparente das amostras embora se saiba que houve a perda de cerca de 50% em peso das mesmas amostras.

Também pode-se observar que houve mudança de cor das amostras queimadas. As amostras de coloração vermelha (TPP, PP-704, PP-RGF) tornaram-se cinza.

Finalmente, houve amostras que se desagregaram completamente: esboroaram.

Observação mais detalhada mostra que algumas das amostras mantiveram uma aparente coerência mas, a um toque ou pressão, se desmanchavam. Enquanto isso, outras amostras mostravam-se mais coerentes, necessitando esforço significativo para desagregar.

Dentre todas, as amostras TPP são as que se mostram mais coerentes e resistentes à desagregação. Podem fragmentar mas não esboroam.

Em Tabela 5-25 e Tabela 5-26 mostra-se, sucintamente, o estado quanto à coerência das amostras queimadas, a perda ao fogo após a queima e o tipo de fragmentação.

Tabela 5-25 – Resultados do segundo ciclo de testes de queima.

| Amostra | Umidade | PF Bseca* | Obs. Macroscópica | Fragmentação |
|----------------|----------------|------------------|--------------------------------|---------------------|
| TJ-01 | 0,1696 | 0,5097 | Crepitou - Frags pouco resist. | Intragranular |
| TJ-02 | 0,5642 | 2,1150 | Esboroa ao toque | Intragranular |
| TJ-03 | 0,3606 | 1,2450 | Esboroa ao toque | Intragranular |
| TJ-04 | 0,3480 | 0,8996 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| TJ-05 | 0,4498 | 1,2930 | Crepitou - Frags resistentes | Inter + Intra |
| TJ-06 | 0,3252 | 0,8104 | Crepitou + c/ bast. finos | Intragranular |
| TJ-07 | 0,3584 | 1,0140 | Crepitou + c/ bast. finos | Inter + Intra |
| TJ-08 | 0,5286 | 1,9590 | Crepitou - Frags pouco resist. | Intragranular |
| TJ-09 | 0,2236 | 1,0240 | Crepitou - Frags pouco resist. | Intragranular |
| TJ-10 | 0,5119 | 1,6790 | Crepitou - Frags pouco resist. | Inter + Intra |
| TP-01 | 0,4936 | 1,5020 | Crepitou - Frags pouco resist. | Intragranular |
| TP-02 | 0,5381 | 1,5110 | Crepitou - Frags pouco resist. | Inter + Intra |
| TP-03 | 0,4906 | 1,3920 | Crepitou - Frags pouco resist. | Inter + Intra |
| TP-04 | 0,5517 | 1,6720 | Esboroa ao toque | Inter + Intra |
| TP-05 | 0,4855 | 1,4260 | Esboroa ao toque | Inter + Intra |
| TP-06 | 0,4361 | 1,3330 | Esboroou | Inter + Intra |
| TP-07 | 0,5272 | 1,9540 | Esboroou | Inter + Intra |
| TP-08 | 0,6216 | 2,1360 | Esboroou | Inter + Intra |
| TP-09 | 0,5878 | 2,2880 | Crepitou - Frags pouco resist. | Intragranular |
| TP-10 | 0,4923 | 1,7430 | Crepitou - Frags pouco resist. | Inter + Intra |
| TPP-01 | 0,0919 | 0,2676 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| TPP-02 | 0,1857 | 0,3987 | Crepitou + Frags pouco resist. | Intragranular |
| TPP-03 | 0,1451 | 0,4086 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| TPP-04 | 0,2342 | 0,4499 | Crepitou + Frags pouco resist. | Intragranular |
| TPP-05 | 0,1464 | 0,3456 | Crepitou + Frags pouco resist. | Intragranular |
| TPP-06 | 0,1107 | 0,2438 | Crepitou + Quase esboroou | Intragranular |
| TPP-07 | 0,1922 | 0,4606 | Crepitou - Frags pouco resist. | Intragranular |
| TPP-08 | 0,1473 | 0,3151 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| TPP-09 | 0,1402 | 0,2708 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| TPP-10 | 0,1520 | 0,3162 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |

* Perda ao fogo, base seca; Valores expressos em porcentagem ponderal.

Tabela 5-26 – Resultados do segundo ciclo de testes de queima (Continuação da Tabela 5-25)

| Amostra | Umidade | PF Bseca* | Obs. Macroscópica | Fragmentação |
|----------------|----------------|------------------|--------------------------------|---------------------|
| 704-01 | 0,1276 | 0,3565 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| 704-02 | 0,2841 | 0,9163 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| 704-03 | 0,2233 | 0,8446 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| 704-04 | 0,1885 | 0,7881 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| 704-05 | 0,1628 | 0,3995 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| 704-06 | 0,1575 | 0,3800 | Crepitou - Frags resistentes | Inter + intra |
| 704-07 | 0,2239 | 0,6499 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| 704-08 | 0,1652 | 0,4781 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| 704-09 | 0,1608 | 0,3991 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| 704-10 | 0,1324 | 0,3976 | Crepitou + Frags pouco resist. | Inter + intra |
| BGF-01 | 0,1519 | 0,3889 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-02 | 0,2345 | 0,6632 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-03 | 0,2844 | 0,7986 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-04 | 0,3634 | 1,0940 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-05 | 0,3761 | 1,1320 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-06 | 0,2956 | 0,8325 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-07 | 0,3003 | 0,7998 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-08 | 0,3509 | 0,9507 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-09 | 0,3366 | 1,0050 | Esboroou | Intergranular |
| BGF-10 | 0,3249 | 0,8749 | Esboroou | Intergranular |
| RGF-01 | 0,1534 | 0,3795 | Crepitou + c/ bast. finos | Inter + Intra |
| RGF-02 | 0,1686 | 0,5441 | Crepitou - Frags resistentes | Inter + Intra |
| RGF-03 | 0,2268 | 0,6200 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| RGF-04 | 0,2108 | 0,5409 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| RGF-05 | 0,1872 | 0,5125 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| RGF-06 | 0,1816 | 0,5382 | Crepitou - Frags resistentes | Intragranular |
| RGF-07 | 0,2165 | 0,5346 | Crepitou + c/ bast. finos | Inter + Intra |
| RGF-08 | 0,2066 | 0,3952 | Crepitou - Frags resistentes | Inter + Intra |
| RGF-09 | 0,3265 | 0,8914 | Crepitou - Frags resistentes | Inter + Intra |
| RGF-10 | 0,3255 | 1,0390 | Crepitou - Frags resistentes | Inter + Intra |

* Perda ao fogo, base seca; Valores expressos em porcentagem ponderal.

Os fragmentos das amostras após a queima, quando observados ao microscópio eletrônico de varredura, em aumentos da ordem de 5 a 10 mil vezes, revelam uma estrutura extremamente porosa, como seria de se esperar uma vez que houve perda de massa sem redução do volume aparente.

Mesmo em aumentos da ordem de 100.000X não se observaram, em nenhuma das amostras estudadas, os cristalitos de MgO (que seriam cristais cúbicos). Provavelmente ainda se encontram em tamanho muito pequeno (da ordem de poucas dezenas de Å), além do poder de resolução do microscópio utilizado. O que se pode ver são prováveis aglomerados de cristalitos.

É notável a diferença de tamanho dos aglomerados. Nas amostras tipo Pedra Preta, que se comportam melhor com respeito à decrepitação, com exceção da PP-BGF, o tamanho dos aglomerados é, em média, maior que nas outras. Também já é perceptível o início de sinterização.

Nas amostras em que ocorreu esboroamento os aglomerados de cristalitos são menores e o aspecto de sinterização não é observável.

Para se ter uma visão mais abrangente do fenômeno decrepitação mostra-se, na Figura 5-45, as elétrôn-micrografias das amostras após a queima, juntamente com o seu comportamento, todas com a mesma ampliação.

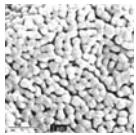
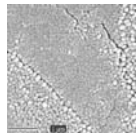
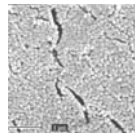
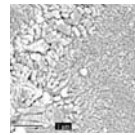
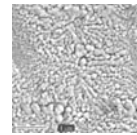
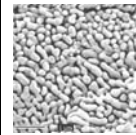
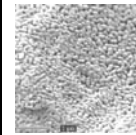
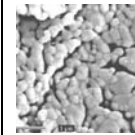
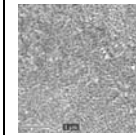
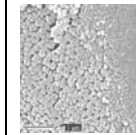
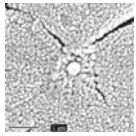
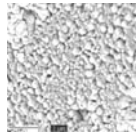
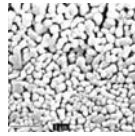
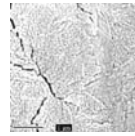
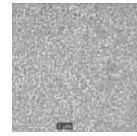
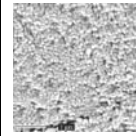
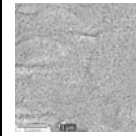
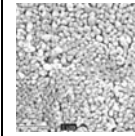
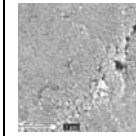
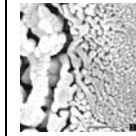
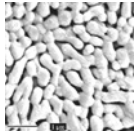
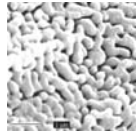
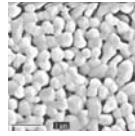
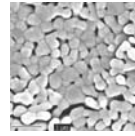
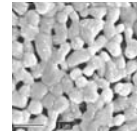
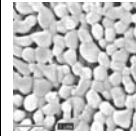
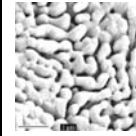
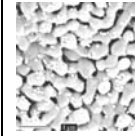
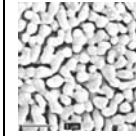
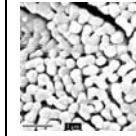
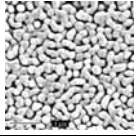
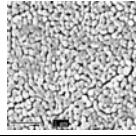
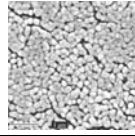
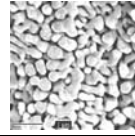
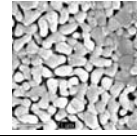
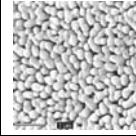
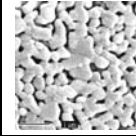
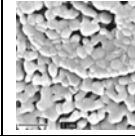
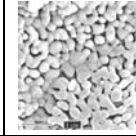
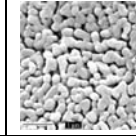
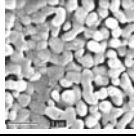
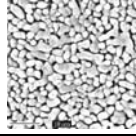
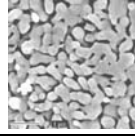

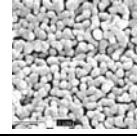
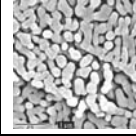
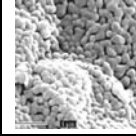
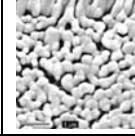
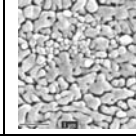
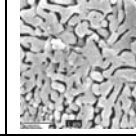
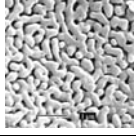
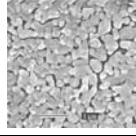
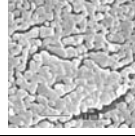
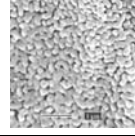
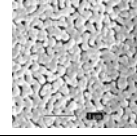
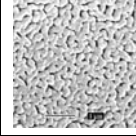
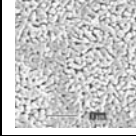
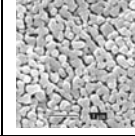
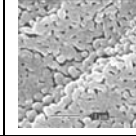
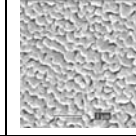

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|
| TJ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| | Crepitou | Esboroou | Esboroou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou |
| TP |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Crepitou | Crepitou |
| TPP |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou |
| PP-704 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou |
| PP-RGF |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou | Crepitou |
| PP-BGF |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 μm  | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou | Esboroou |

Figura 5-45 – Elétron-micrografias de fragmentos de magnesita queimada mostrando a microestrutura e o comportamento à queima.

O aumento é o mesmo para todas as elétrón-micrafias (ver escala no canto inferior esquerdo da tabela). Imagens de elétrons secundários.

A Figura 5-46 mostra, com maior detalhe, a diferença de tamanho dos aglomerados de cristalitos de MgO nas amostras de magnesita após a queima. Observe-se que todas as imagens foram feitas com a mesma ampliação.

Também o grau de sinterização varia nas amostras e, aparentemente, é correlacionável ao tamanho dos agregados de cristalitos. A Figura 5-47 mostra os extremos de graus de sinterização nas amostras estudadas.

Como se observa na Figura 5-47A, a sinterização ainda não se iniciou. Os aglomerados de cristalitos de MgO não mostram qualquer sinal de soldamento. Ao contrário, na Figura 5-47F a sinterização já é perfeitamente visível, não só pelo crescimento mas também pela formação das cinturass de ligação entre os aglomerados (coalescência).

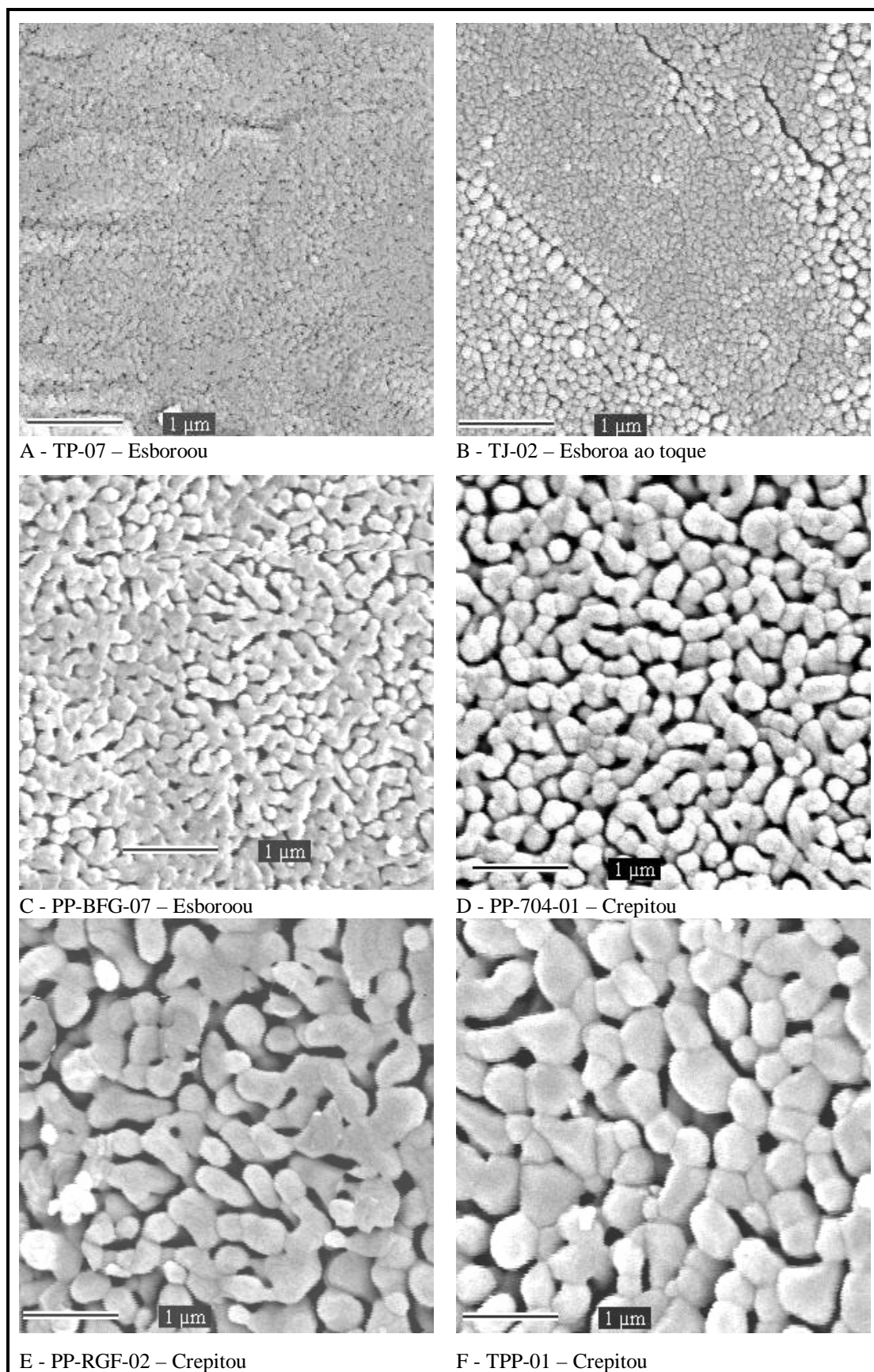


Figura 5-46 – Elétron-micrografias mostrando diferenças de tamanho dos agregados de cristallitos. Imagens de elétrons secundários.

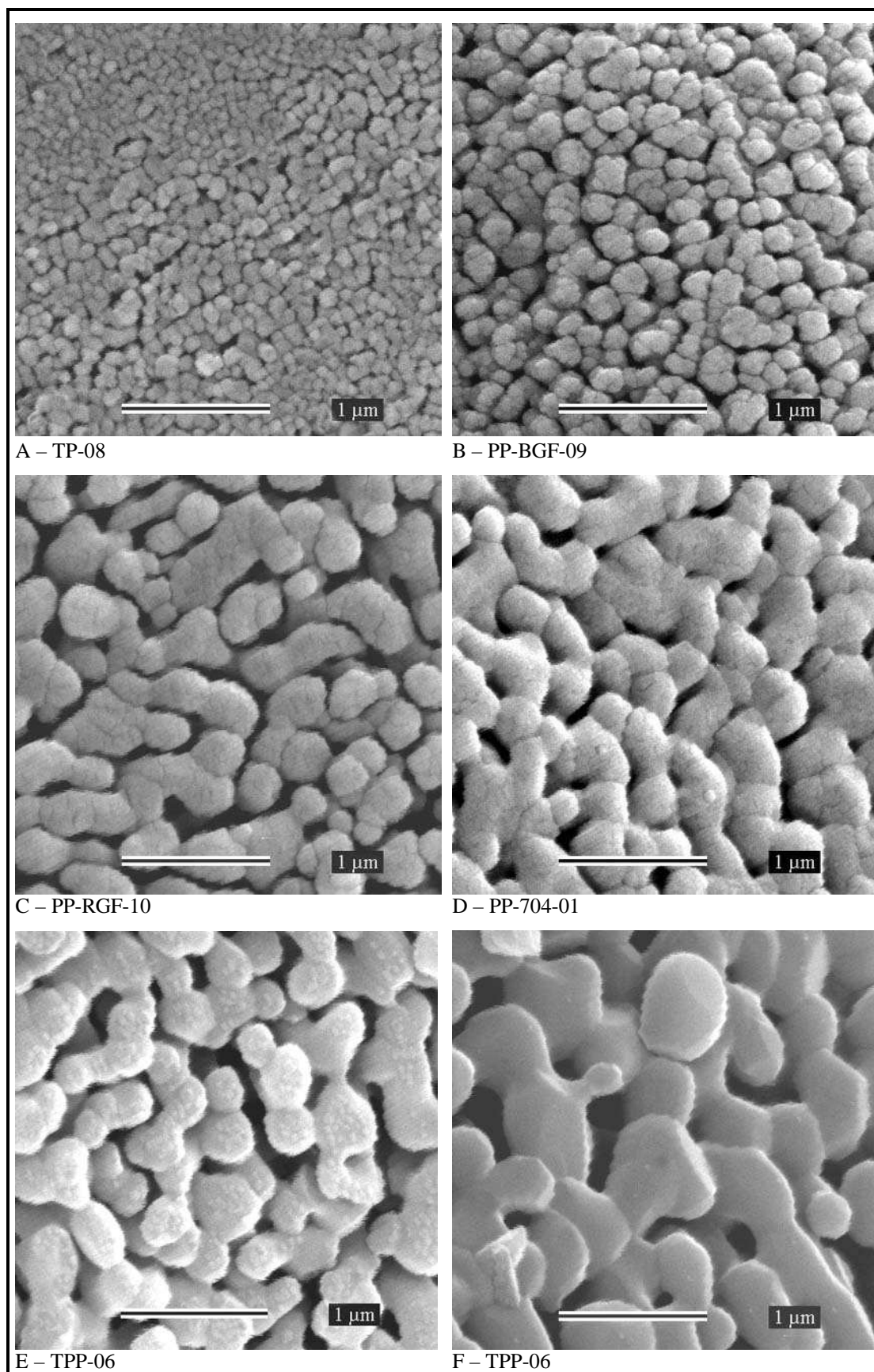


Figura 5-47 – Elétron-micrografias mostrando a variação do grau de sinterização nas amostras estudadas. Imagens de elétrons secundários.

5.9 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.9.1 – Microscopia Óptica

Os estudos microscópicos em luz polarizada forneceram a identificação da mineralogia principal e das características físicas dos minerais (tamanho de grão, textura e contatos). Assim é que observa-se que as amostras são constituídas basicamente de magnesita, contendo, em percentagem pequena, talco, dolomita, clorita e hematita.

A diferenciação das magnesitas em vermelhas, brancas e incolores é motivada pela presença ou ausência de inclusões. A coloração vermelha é devida à presença de poeira de opacos. A branca pela presença de inclusões não opacas (talco, dolomita e inclusões fluidas). A magnesita incolor é essencialmente límpida, isto é, não apresenta inclusões.

Quanto à textura, as amostras se dividem em aquelas onde os contatos são predominantemente simples (retos) e aquelas onde estes são complexos (endentados ou suturados). Nas primeiras, os cristais têm tendência para subédricos a euédricos e granulação mais fina. Enquanto isso, as outras mostram normalmente cristais de granulação mais grossa e predominantemente anédricos. No primeiro grupo, estão as amostras tipo Pomba, Jatobá e a PP-Branca de Grã Fina. No segundo, estão as amostras tipo Pedra Preta (TPP, PP-704 e PP-RGF).

Acredita-se que os contatos simples podem facilitar a desagregação das amostras. De fato, parece haver uma correlação, ainda que subjetiva, entre este parâmetro e o comportamento indesejado.

5.9.2 – Catodoluminescência

Os resultados das observações em catodoluminescência mostram que há, pelo menos, duas variedades de magnesita. Uma com baixo teor de manganês e ferro e outra mais rica nesses elementos.

São observados sobrecrecimento e também zonamento químico (com variação na relação Mn/Fe), o que indica variação das condições físico-químicas na solução a partir da qual se formaram as magnesitas.

5.9.3 – Inclusões fluidas

As inclusões fluidas são mais notáveis nas magnesitas brancas. O tamanho está normalmente abaixo de 10 μ m o que pode indicar que tais inclusões têm pouca possibilidade de causar danos aos minerais hospedeiros quando aquecidas, mas não podem ser descartadas. Já as maiores que 10 a 15 μ m em princípio são potencialmente capazes de causar fissuras ou fragmentação nos cristais hospedeiros.

De qualquer maneira os danos que podem ser causados pela explosão das IF devem acontecer em temperaturas abaixo da temperatura de dissociação da magnesita. Deve-se ressaltar que, além da possibilidade da desagregação intragranular ter sido causada pela explosão de inclusões fluidas, não se tem evidências concretas de tal efeito sobre as amostras estudadas.

De acordo com o estudo feito por Kazuo Fuzikawa, no item 5-4, pode-se concluir que as inclusões primárias analisadas devem ter sido aprisionadas durante a recristalização do cristal de magnesita sob uma temperatura de aproximadamente 400°C (ou maior) e a uma pressão da ordem de 2 Kbar (o que equivaleria a uma profundidade de aproximadamente 6 Km).

5.9.4 – Microanálise

As análises quantitativas por microsonda eletrônica mostram as composições químicas dos principais minerais formadores das amostras estudadas (magnesita, talco, clorita e hematita). O Anexo A mostra os resultados das microanálises utilizadas para o cálculo das médias apresentadas. As análises qualitativas (EDS) mostram a composição de minerais acessórios como a apatita, monazita, zirconita, rutilo e, também, um mineral não identificado (óxido/hidróxido de titânio, ferro e

antimônio), uma possível **derbylita**. Ver no Anexo B informações detalhadas sobre este mineral.

Através de mapeamento de raios-X e também análises em áreas específicas onde, por catodoluminescência, se observava zonamento químico, foi comprovado que a variação em catodoluminescência tem a ver com a variação da relação Mn/Fe.

Verifica-se que entre os tipos de magnesita, identificados microscopicamente, (vermelha, branca e incolor), de um mesmo tipo de amostra/minério não há diferença sensível de composição quando se observam as médias. No entanto, observando-se os dados mostrados no Anexo B, verificam-se variações nas concentrações de manganês e ferro, suficientes para provocar as diferenças de tonalidade mostradas pela catodoluminescência.

Por outro lado, conforme se observa nas magnesitas de diferentes amostras, existe uma óbvia variação nas concentrações de manganês e ferro, podendo se distinguir pelo menos duas variedades: magnesita com baixo manganês (abaixo de 0,20% MnO) e magnesita com mais elevado teor em manganês (acima de 0,20 % MnO). A Figura 5-35 ilustra esse aspecto. Assim é que as amostras TJ, TP e PP-BGF contêm o manganês em concentrações baixas enquanto as amostras TPP, PP-704 contêm o elemento em concentração nítidamente mais alta. A amostra PP-RGF parece ter os dois tipos de magnesita.

Outro aspecto interessante é que, embora o teor de cálcio seja aproximadamente constante em todas as amostras (cerca de 0,20% de CaO), nas amostras TJ e TP a concentração deste elemento excede, em muito, o teor de manganês.

Conforme se viu na revisão sobre calcinação e sinterização, Eubank (1951), Nelson e Cutler (1958), Kriek, Ford e White (1959), Layden e McQuarrie (1959), Treffner (1964), Spencer (1972) e Duarte (1982) concluem que manganês mais elevado, a presença de titânio, ferro férrico (Fe^{+3}), alumínio e silício seriam benéficos em relação ao aspecto sinterização. Já a presença de ferro ferroso (Fe^{+2}) e cálcio, pode causar efeito adverso. Desta forma, parece lógico que o comportamento das amostras tipo Pedra Preta face a calcinação e sinterização seja mais favorável que o das amostras tipo Pomba e Jatobá.

5.9.5 – Difractometria de raios-X

Os dados obtidos para os parâmetros cristalinos das magnesitas estudadas não mostram diferença sensível, em termos de estrutura cristalina, entre as magnesitas estudadas. Assim sendo, embora não se possa descartar a possibilidade de alívio de tensão através do aquecimento e expansão diferencial entre os grãos, não se pode concluir que hajam tensões residuais ou deformações na estrutura cristalina que pudessem causar decrepitação.

5.9.6 – Termoanálises

Da mesma forma que o estudo por difração de raios-X, a termoanálise não trouxe contribuição efetiva para a elucidação do fenômeno decrepitação. De objetivo nestes estudos tem-se apenas a temperatura de dissociação do carbonato predominante, a magnesita, que acontece em torno de 650°C.

5.9.7 – Testes de queima

No primeiro ciclo de testes de queima a perda ao fogo, bastante elevada nas amostras TJ, TP e PP-BGF (Tabela 5-24), pode ser creditada a uma ou mais de três possibilidades: núcleos de material não calcinado encapsulado (“cores”), recarbonatação parcial do material dissociado e, finalmente, umidade adsorvida no tempo transcorrido entre a retirada das amostras e a determinação da PF.

No segundo ciclo de testes de novo observa-se que as amostras TJ, TP e PP-BGF apresentam valores mais elevados de PF do que as demais amostras do tipo Pedra Preta (Tabela 5-25 e Tabela 5-26). Com a discriminação da perda relativa à umidade, verifica-se que as referidas amostras TJ, TP e PP-BGF adsorveram mais umidade, além de continuarem com os valores da PF BSeca elevados. Os valores elevados da PF, observados nas amostras TJ, TP e PP-BGF, podem ser explicados pelo fato de que nestas amostras os cristalitos, pouco desenvolvidos, oferecem uma superfície específica muito maior que nas amostras tipo Pedra Preta nas quais o tamanho dos aglomerados de cristalitos é maior e a sinterização já é bem

perceptível. A superfície específica maior provavelmente favorece a recarbonatação e também a adsorção de umidade durante o resfriamento.

Os testes de queima em um lote de dez amostras de cada minério mostram razoável concordância em termos de resultado. De modo geral, pode-se dizer que a totalidade das amostras mostrou algum tipo de desagregação. Algumas foram reduzidas a um amontoado incoerente de partículas tamanho areia (esboroaram), enquanto outras permaneceram razoavelmente coerentes, com algum fraturamento, geração de finos e ou fissuramento (crepitaram).

De modo geral, pode-se dizer que as amostras PP-Branca de Grã Fina, Pomba e Jatobá, mostraram comportamento indesejado, enquanto as amostras tipo Pedra Preta, Típica, Rosa de Grã Fina e 704, mostraram comportamento razoável.

A hipótese de que o tamanho de grão traria problema se fosse fino verificou-se falsa. As amostras PP-BGF (Branca de Grã Fina) todas esboroaram mas as PP-RGF (Rosa de Grã Fina) tiveram um comportamento razoável.

Ao se estudar os finos produzidos pela ação da queima, observa-se diferença sensível no tamanho dos aglomerados de cristalitos de MgO, bem como no grau de sinterização. As amostras que não se comportam bem exibem pouco desenvolvimento nos aglomerados de cristalitos bem como sinterização praticamente inexistente. Já as que se caracterizaram por bom comportamento exibem aglomerados bem mais desenvolvidos e, principalmente, sinterização já perceptível ou bastante desenvolvida.

6. CONCLUSÕES

As amostras de magnesita estudadas exibem algumas características físicas e químicas que parecem ter correlação positiva com seu comportamento no processo de queima, em relação ao fenômeno da decrepitação. Assim é que amostras com contatos endentados entre grãos, com presença de manganês e Fe^{+3} elevado são propensas a dar bons resultados na queima, se desintegrando menos. Já a escassez de Fe^{+3} e de manganês além de contato retilíneo entre os grãos da magnesita, parecem poder ser correlacionados com as amostras com mau comportamento.

As amostras tipo Pomba, Jatobá e PP-Branca de Grã Fina, apresentando os aspectos desfavoráveis mencionados acima, são as que mostraram, com maior intensidade, resultados indesejados. Em contrapartida, as amostras do tipo Pedra Preta: Típica, Rosa de Grã Fina e 704 exibiram comportamento razoavelmente aceitável.

Com base nas informações da bibliografia e nos testes realizados conclui-se que a decrepitação, no sentido amplo, pode ser um somatório de mecanismos tais como:

- desagregação causada pela pressão gerada na liberação de grande quantidade de CO_2 produzido na dissociação,
- facilitada por contatos simples entre os cristais de magnesita.
- fragmentação causada por explosão de inclusões fluidas. A fragmentação do tipo intragranular parece ser uma indicação de desagregação anterior à dissociação e possivelmente causada pela explosão de inclusões fluidas e/ou alívio de tensão interna.
- geração de cristalitos infinitesimais do óxido de magnésio, formados na dissociação do carbonato, que não se coalescem a tempo de evitar o colapso da estrutura. Os valores altos da perda ao fogo determinada no material queimado parece um bom indicador da superfície específica

elevada que, por sua vez, é motivada pelo pequeno tamanho dos aglomerados de cristalitos e pela falta de sinterização.

A sinterização parece ser o fenômeno mais importante na manutenção de coerência estrutural das amostras. Este fenômeno, por sua vez, parece ser favorecido por aspectos químicos e físicos:

- a presença de elementos que promoveriam o crescimento e conseqüente coalescência dos cristalitos de MgO formados na dissociação. Dentre esses elementos destacam-se o manganês, ferro III e o titânio.
- Alumínio e silício em concentrações adequadas.
- Contatos endentados entre os grãos da magnesita original.
- Temperatura e tempo de queima adequados.

Entre as afirmações: o minério “crepita porque não sinteriza” ou “não sinteriza porque crepita”, fica-se com a primeira. Nos testes de queima, alguns minérios esboroaram e outros não. Os que esboroaram não mostram sinal de sinterização. Como todos os minérios foram queimados nas mesmas condições, se a sinterização dependesse apenas da temperatura e do tempo de queima, mesmo as amostras desagregadas deveriam apresentar os mesmos níveis de aglomeração e sinterização. O fato desses parâmetros serem diferentes indica que existem condições, além da temperatura e do tempo, facilitando, ou acelerando, a sinterização. Acredita-se que a composição química possa ser a diferença.

Com base nos testes e análises efetuados nas amostras estudadas sugere-se alguns indicadores que, logicamente com devida cautela, poderiam ser utilizados na previsão do comportamento dos minérios durante o processo de monoqueima.

O procedimento mais expedito para se tentar prever o comportamento da magnesita durante a queima seria a dosagem do teor de manganês. Valores acima de 0,20% de MnO seriam indicadores de possível bom comportamento. As amostras tipo Pedra Preta (TPP, PP-704 e PP-RGF) têm concentrações significativamente maiores que esse valor. Já as amostras tipo Pomba, Jatobá e Branca de Grã Fina exibem teores significativamente menores que esse limite.

Uma segunda possibilidade seria o valor da perda ao fogo do material após teste de queima simulando a monoqueima. Valores acima de 1% , encontrados nas amostras TJ, TP e na PP-BGF, são possíveis indicadores de mau comportamento, enquanto valores abaixo de 1%, encontrados nas amostras tipo Pedra Preta (TPP, PP-704 e PP-RGF, seriam indicadores de bom comportamento.

Finalmente, uma terceira possibilidade de indicador seria a medida de superfície específica, ou de densidade, no produto do teste de queima. Como ambos refletem o grau de sinterização do material, tem-se que: valores altos de superfície específica, ou valores baixos de densidade, indicariam possível mau comportamento. Inversamente, valores baixos de superfície específica, ou valores elevados de densidade, seriam indicadores de possível bom comportamento.

Seria necessário, ainda, fazer-se medidas da superfície específica e da densidade nas amostras estudadas, e cujo comportamento é conhecido, para se determinar os valores que serviriam de referência na utilização deste indicador.

As observações feitas nas inclusões primárias, trifásicas, presentes na amostra TPP-B permitem afirmar que se as inclusões observadas tiverem sido aprisionadas durante a recristalização do cristal de magnesita sob uma temperatura de no mínimo 400°C a pressão correspondente seria da ordem de 2 Kbar no mínimo.

7. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO

Ressalta-se a utilização conjunta de diferentes técnicas de caracterização, de modo integrado, e uma visão abrangente do ponto de vista de caracterização mineralógico-química, na tentativa de melhor entendimento do problema decrepitação.

A constatação da sinterização como provável principal responsável pela manutenção da coerência do material queimado.

A identificação da natureza e a distribuição de elementos potencialmente interessantes ou deletérios e sua possível contribuição para a o grau de sinterabilidade do material.

O descobrimento preliminar de **derbylita**, um mineral raro que só foi descrito em duas localidades no mundo.

As análises quantitativas dos minerais principais das amostras estudadas.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as observações feitas nas amostras estudadas, alguns trabalhos podem ser sugeridos para posterior realização.

Datação das amostras usando-se a zirconita. Uma vez que este mineral parece ser detrítico, a datação obtida indicaria a idade das rochas fontes dessa zirconita. Teria-se, assim, a idade inferior da formação do depósito de magnesita.

Microtermometria das inclusões fluidas: daria informações sobre a composição dos fluidos, a temperatura e a pressão de formação dos depósitos.

Estudo dos isótopos leves estáveis e análise da assinatura dos elementos das terras-raras (ETR). Esses podem contribuir com informações para elucidar a origem dos jazimentos.

Confirmação e caracterização da possível derbylita encontrada na amostra TP-A. Trata-se de um mineral raro do qual só se conhecem duas ocorrências no globo e, portanto, merece atenção.

Aquecimento controlado para observação e determinação das temperaturas de decrepitação e dissociação, bem como acompanhamento da evolução dos aglomerados de cristalitos de periclásio e do grau sinterização através de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e/ou através de microscopia eletrônica de transmissão (MET).

Monoqueima de magnesita potencialmente decrepitável com adição de hematita, óxido de manganês, óxido de titânio e/ou cloreto de magnésio, para a verificação de seu efeito na prevenção da decrepitação.

Referências Bibliográficas

- ALLMAN, M.; LAWRENCE, D. F. *Geological Laboratory Techniques*. New York: Arco Publishing Company, Inc., 1972. 335 p.
- ALMEIDA, T. I. R. de. *Magnesita do depósito de Campo de Dentro, Serra das Éguas, Bahia: Geoquímica e Gênese*. 1989. 153 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ARLT, H.; STEINMETZ, H. Über ein neues Mineralvorkommen aus Brasilien : Zeitsch. Krist . u. Min., Band 54, pp. 590-606, 1915.
- BAIN, G. W. Types of magnesium deposits and their origin. *Economic Geology*, v. 19, n. 5, p. 412-423, 1924.
- BALANÇO MINERAL BRASILEIRO 2001. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, [s.d]. Site da Internet acessado em 17 de março de 2004. Disponível em: < http://www.dnpm.gov.br/dnpm_legis/Balanco01/pdf/magnesita.pdf>.
- BARBOSA, C. P.; FALSTER, A. U.; SIMMONS, W. B.; WEBBER, K. L.; NIZAMOFF, J.; GAINES, R. V. Minerals of the Brumado Magnesite Deposits, Serra das Éguas, Bahia, Brazil. *Rocks & Minerals*, v. 75, n. 1, p. 32-39, jan./fev. 2000.
- BARBOSA, O. Magnesita da Serra das Éguas, Baía. *Mineração e Metalurgia*, v. 7, n. 38, p. 71-73, 1943.
- BISH, D.L.; REYNOLDS JR., R. C. Sample preparation for X-ray diffraction. In: BISH, D. L.; POST, J. E. (Editors) *Modern Powder Diffraction* (Reviews in Mineralogy, v. 20). Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1989. cap. 4, p.73-99.
- BITTENCOURT, L. R. M. *Densification and grain growth of a refractory grade magnesia derived from magnesite*. 1995. 348 f. Dissertation (Doctor of Philosophy in Ceramic Engineering). University of Missouri-Rolla, USA.

- BODENLOS, A. J. *Magnesite deposits of Central Ceará, Brazil* (Geological Survey Bulletin 962-C). Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1950. 36 p.
- BODENLOS, A. J. *Magnesite deposits in the Serra das Éguas, Brumado, Bahia, Brazil* (Geological Survey Bulletin 975-C). Washington, D.C.: U. S. Government Printing Office, 1954. 63 p.
- BOYNTON, R. S. *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, New York: Interscience Publishers, 1966. 520 p.
- CASSEDANE, J. P; CASSEDANE, J.O. Famous mineral localities: the Brumado district; Bahia, Brazil. *The Mineralogical Record*. v. 9, n. 3, p.196-204. May-June, 1978.
- CRAIG, J.R.; VAUGHN, D.J. *Ore Microscopy & Ore Petrography*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994. 434 p.
- CREMER, E.; GATT, F. Kinetics of thermal decomposition of magnesites. *Radex Rundsch.*, v. 7, p. 257-261, 1949 *apud* SHEILA, D. Thermal analysis studies on the decomposition of magnesite. *International Journal of Mineral Processing*, v. 37, p. 73-88, 1993.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, M.A. *Rock Forming Minerals*. London: Longman, 1975. v. 1 a 5.
- DOLLIMORE, D.; DUNN, J. G.; LEE, Y. F.; PENROD, B. M. The decrepitation of dolomite and limestone. *Thermochimica Acta*, n. 237, p. 125-131, 1994.
- DUARTE, A. K. *The influence of manganese oxide on sintering of a commercial natural magnesite*. 1982. 162 f. MSc Thesis in Ceramic Engineering – University of Missouri-Rolla, USA.
- DUNCAN, L. R.; McCracken, W. H. Magnesite and Magnesite. In CARR, D. D. (Ed). *Industrial Mineral and Rocks*, 6th ed. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1994. pp. 643-654.
- ELLMIES, R.; VOIGTLÄNDER, G.; GERMANN, K.; KRUPENIN, M. T.; MÖLLER, P. Origin of giant stratabound deposits of magnesite and siderite in

- Riphean carbonate rocks of the Bashkir mega-anticline, western Urals. *Geol. Rundsch.*, 87, p. 589-602, 1999.
- EUBANK, W. R. Calcination Studies of Magnesium Oxides. *J. Amer. Ceram. Soc.*, v. 34, n. 8, p. 225-229. August, 1951.
- FORMOSO, M. L. L. Difractometria de Raios-X . In: GOMES, C. B. (Ed.) *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à Geologia*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1984. cap. 1, p. 1-43.
- FURMAN, F. C.; ABLIN, V. C.; MOORE, R. R.; GREGG, J. M. The influence of dolomite genesis on sinterability. In HAGNI, R. D. (Ed.) *Process Mineralogy XIII*. [s.l.]: The Minerals and Metals Society (TMS), 1995. p.287-305.
- FUZIKAWA, K. Inclusões fluidas: métodos usuais de estudo e aplicações. In: *Contribuições à Geologia e à Petrologia*. Belo Horizonte: SBGM Núcleo de Minas Gerais, 1985. p. 29-44.
- GARCIA, L. R. A. *Introdução à Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise*, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear CDTN/CNEN, agosto 2001. 23 p. Inédito.
- GASPARRINI, C. The mineralogy of gold and its significance in metal extraction. *CIM Bulletin*, v.76, n. 851, p.144-153, 1983.
- GEOESTRUTURAL CONSULTORIA E PROJETOS *Reavaliação do modelo geológico dos magnesititos da mina Pedra Preta, Brumado, BA*. [s.l.]: Magnesita S.A., 2002. 18 p. Relatório.
- GOMES, C.B. Microsonda Eletrônica: Princípios e aplicações na Geologia. In: GOMES, C.B. (Ed.) *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à Geologia*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1984. cap. 5, p. 159-208.
- GOMES, N. S. Catodoluminescência: Breve retrospectiva da Técnica e Exemplos de sua Aplicação ao Estudo das Rochas Sedimentares. *Revista Escola de Minas*, v. 44, n. 1, p. 16-27, Jan/Mar 1991.

- GRUBB, P. L. C. Genesis of an unusual magnesite deposit in Bahia State, Brazil. In: *Symp. Metallog. Mafic and Ultramafic Complexes*. Athens: Unesco, 1981. v. 3, p.361-374.
- HAGNI, R.D. Ore microscopy applied to beneficiation. *Mining Engineering*, v.30, p.1437-1447, 1978.
- HENLEY, K. J. Ore-Dressing - A review of techniques applications and recent developments. In: *PROC. FIRST INT. CONGR. APPLIED MINERALOGY (ICAM 81)*. [s.l.]: Geological Society of South Africa, 1983. Special Publication n.7, p.175-200.
- HOLLISTER, L. S. Information intrinsically available from fluid inclusions. In: HOLLISTER, L. S.; CRAWFORD, M. L. (Editors). *Short course in fluid inclusions: Applications to Petrology*. Calgary: Mineralogical Association of Canada, 1981. cap. 1, p. 1-12.
- HUTCHISON, C. S. *Laboratory handbook of petrographic techniques*. New York: John Wiley & Sons., 1974. 527 p.
- ILIC, M. Problems of the genesis and genetic classification of magnesite deposits. *Geol. Carpathica*, vol. 19, n. 1, p. 284-292. 1968 *apud* POHL, W.; SIEGL, W. Sediment-hosted magnesite deposits. In: WOLF, K. H. (Ed.) *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, Part IV*, v. 14. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., cap. X, p. 223-310, 1986.
- JÄRNEFELT, O.; MERZ, J. A. A magnesita da Serra das Éguas e sua aplicação na indústria de refratários. Separata de: *Boletim da Associação Brasileira de Metais*, n. 9, p. 633-641, outubro 1947.
- JOHANNES, W. Experimentelle Magnesitbildung aus Dolomit + MgCl₂. *Contr. Mineral. Petrol.*, 13, p. 51-58. 1966, *apud* KRALIC, M.; AHARON, P.; SCHROLL, E.; ZACHMANN, D. Carbon and oxygen isotope systematics of magnesites: a review. In: MÖLLER, P. (Ed.) *Magnesite: Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-Carbonates* (Monograph Series on Mineral Deposits, n. 28). Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1989. cap. 6, p. 197-223.

- JOHANNES, W. Zur Entstehung von Magnesitvorkommen. *N. Jb. Miner. Abh.*, 113, p. 274-325. 1970, *apud* KRALIC, M.; AHARON, P.; SCHROLL, E.; ZACHMANN, D. Carbon and oxygen isotope systematics of magnesites: a review. In: MÖLLER, P. (Ed.) *Magnesite: Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-Carbonates* (Monograph Series on Mineral Deposits, n. 28). Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1989. cap. 6, p. 197-223.
- JOSHI, M. N.; BHATTACHARYA, A. K.; ANANTHARAMAN, M. S. Origin of the sparry magnesite deposits around Bauri, Almora district, Uttar Pradesh, India. *Mineralium Deposita*, 28, p. 146-152, 1993.
- KATO, T. The origin of the Manchurian magnesite deposits. *Economic Geology*, v. 24, p. 90-93, 1929.
- KERR, P. F. *Optical Mineralogy*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959. 442 p.
- KERRICK, D.M.; EMINHIZER, L.B.; VILLAUME, J.F. The role of carbon film thickness in electron microprobe analysis. *American Mineralogist*, v.58, p. 920-925, 1973.
- KIESL, W.; KOEBERL, C.; KÖRNER, W. Geochemistry of magnesites and dolomites at the Oberdorf/Laming (Austria) deposit and implications for their origin. *Geol. Rundsch.*, 79, p. 327-335, 1990.
- KLUG, H.P.; ALEXANDER, L.E. *X-Ray Diffraction Procedures for polycrystalline and amorphous materials*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967. 716 p.
- KOSTOV, I. *Mineralogy*. 1st english ed. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1968. 587 p.
- KRALIC, M.; AHARON, P.; SCHROLL, E.; ZACHMANN, D. Carbon and oxygen isotope systematics of magnesites: a review. In: MÖLLER, P. (Ed.) *Magnesite: Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-Carbonates* (Monograph Series on Mineral Deposits, n. 28). Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1989. cap. 6, p. 197-223.

- KRIEK, H. J. S., FORD, W. F.; WHITE, J. The Effect of Additions on the Sintering and Dead-burning of Magnesia. *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, v. 58, n. 1, p. 1-34, January, 1959.
- KUBAS, Z.; SZALKOWICZ, M. The kinetics of thermal decomposition of $MgCO_3$. *Zesz. Nauk. Akad. Gorn.-Hutn. Cracow Metal. Odlew.*, n. 14, p. 47-62. 1967 *apud* SHEILA, D. Thermal analysis studies on the decomposition of magnesite. *International Journal of Mineral Processing*, v. 37, p. 73-88, 1993.
- KULP, J. L.; KENT, P.; KERR, P. F. Thermal study of the Ca-Mg-Fe carbonate minerals. *American Mineralogist*, v. 36, n. 9/10, p. 643-670, 1951.
- LARSON, A. C.; VON DREELE, R. B. General Structure Analysis System (GSAS). Los Alamos National Laboratory Report LAUR 86-748. 2000. Disponível na Internet em <<http://www.ncnr.nist.gov/programs/crystallography/software/gsas.html>>. Acessado em 02 de fevereiro de 2004.
- LAYDEN, G. K.; McQUARRIE, M. C. Effect of Minor Additions on Sintering of MgO . *J. Amer. Ceram. Soc.*, v. 42, n. 2, p. 89-92. February, 1959.
- LEE, S. Composite Materials Glossary. [s.l.d.]. Site da Internet Acessado em 31 de outubro de 2002. Disponível em: <<http://plastics.about.com/library/glossary/blglossary.htm>>.
- LEONARDOS, O. H. Magnesita no Brasil. *Mineração e Metalurgia*, v. 7, n. 37, p. 35-38, 1943.
- LEROY, J. Contribution à l'étalonnage de la pression interne des inclusions fluides lors de leur décrepitation. *Bull. Minéral.*, v. 102, p. 584-593, 1979.
- LIMA, R. C. C. *Aspectos geológicos e mineralizações na área de Brumado: Magnesita na Serra das Éguas*. 1986. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- LITAI, M.; XIANQIU, C. The microstructural changing of magnesite during calcination. In: XIANGCHONG, Z.; JIANQUAN, L.; XINGJIAN, Y. (Editors)

- Proc. Int. Symp. on Refractories. Beijing: International Academic Publishers, 1988.
- MAGNESITA S. A. Especificações de matéria-prima números 0176, 0419 e 0420, edição de 21/08/1998. Documentos internos consultados com autorização da Magnesita S. A.
- MARSHALL, D. J. *Cathodoluminescence of Geological Materials*. Boston: Unwin Hyman, 1988. 146 p.
- MASCARENHAS, J. F. Estruturas do tipo “Greenstone Belt” no leste da Bahia. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29, 1976, Ouro Preto. *Anais do 29º Congresso Brasileiro de Geologia*, v. 4. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1976. p. 25-49.
- MCLAUGHLIN, R. J. W. Thermal Techniques. In: ZUSSMAN, J. (Ed.). *Physical methods in determinative mineralogy*. London: Academic Press, 1967. cap. 9, p. 405-444.
- MELLO JÚNIOR, J. L. Magnesita da Serra das Éguas, Baía. *Mineração e Metalurgia*, v. 7, n. 41, p. 273-274, 1943.
- MINERAL DATABASE, THE, Mineral Search. Site da Internet acessado em 31 de janeiro de 2004. Disponível em <<http://www.mindat.org/>>
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES *Mapas*. [s.l.d.]. Site da Internet acessado em 14 de dezembro de 2003. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/bit/mapas/mapdoc/ufs/ba.pdf>>.
- MORTEANI, G. Fluid inclusions in magnesite. In: MÖLLER, P. (Ed.) *Magnesite: Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-Carbonates* (Monograph Series on Mineral Deposits, n. 28). Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1989. cap. 7, p. 237-239.
- MORTEANI, G.; SCHLEY, F.; MÖLLER, P. On the formation of magnesite. In: SCHNEIDER, H. J. (Ed.) *Mineral Deposits of the Alpine Epoch in Europe*. Springer, 1983. p. 106-116, *apud* KRALIC, M.; AHARON, P.; SCHROLL, E.;

- ZACHMANN, D. Carbon and oxygen isotope systematics of magnesites: a review. In: MÖLLER, P. (Ed.) *Magnesite: Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-Carbonates* (Monograph Series on Mineral Deposits, n. 28). Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1989. cap. 6, p. 197-223.
- MOSTLER, H. Alter und Genese ostalpiner Spatmagnesite unter besonderer Berücksichtigung der Magnesitlagerstätten im Westabschnitt der Nördlichen Grauwackenzone (Tyrol, Salzburg). Veröff. Univ. Innsbruck, 86. p. 237-266. 1973, *apud* KRALIC, M.; AHARON, P.; SCHROLL, E.; ZACHMANN, D. Carbon and oxygen isotope systematics of magnesites: a review. In: MÖLLER, P. (Ed.) *Magnesite: Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-Carbonates* (Monograph Series on Mineral Deposits, n. 28). Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1989. cap. 6, p. 197-223.
- NELSON, J. W.; CUTLER, I. B. Effect of Oxide Additions on Sintering of Magnesia. *J. Amer. Ceram. Soc.*, v. 41, n. 10, p. 406-409, October, 1958.
- NIINOMY, K. The magnesite deposits of Manchuria. *Economic Geology*, v. 20, n. 1, p. 25-53, 1925.
- NISHIHARA, H. An enormous magnesite deposit in Manchuria. *Eng. and Mining Journ.-Press*, v. 119, n. 12, p. 488, 1925, *apud* NISHIHARA, H. Origin of the bedded magnesite deposits of Manchuria. *Economic Geology*, v. 51, p. 698-711, 1956.
- NISHIHARA, H. Origin of the bedded magnesite deposits of Manchuria. *Economic Geology*, v. 51, p. 698-711, 1956.
- OLIVEIRA, V. P., FRAGOMENI, L. F. P.; BANDEIRA, C. A. Depósitos de magnesita de Serra das Éguas, Brumado, Bahia. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E. T.; COELHO, C. E. S. (Coord.) *Principais depósitos minerais do Brasil*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1997. v. IV-C., cap. 18, pp. 219-234.
- OLIVEIRA, V. P.; FRAGOMENI, L. F. P. *Geologia da Serra das Éguas, Brumado – Bahia*. [s.l]: Magnesita S. A., Departamento de Mineração, 1980. 57 p. Relatório.

- PALACHE, C.; BERMAN, H.; FRONDEL, C. *Dana's System of Mineralogy*, 7th ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1963. v. II, 1124 p.
- PANDE, A.; SINGH, R. Electron Microscope and Electron Diffraction Studies of Sintering of Magnesite. *J. Amer. Ceram. Soc.*, v. 41, n. 10, p. 394-397, October, 1958.
- POHL, W.; SIEGL, W. Sediment-hosted magnesite deposits. In: WOLF, K. H. (Ed.) *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, Part IV*, v. 14. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., cap. X, p. 223-310, 1986.
- POHL, W. Genesis of magnesite deposits – models and trends. *Geol. Rundsch.*, 79, p. 291-299, 1990.
- POST, J.E.; BISH, D.L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data. In: BISH, D. L.; POST, J. E. (Editors) *Modern Powder Diffraction* (Reviews in Mineralogy, v. 20). Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1989. cap. 9, p. 277-308.
- QUEIROZ, E. T. Geologia da magnesita. In SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E. T.; COELHO, C. E. S. (Coord.) *Principais depósitos minerais do Brasil*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1997. v. IV-C., cap. 17, p. 205-218.
- QUEMENEUR, J. *Les gisements de magnesite du Pays Basque: Cadre géologique et sédimentologique; genèse de la magnesite en milieu sédimentaire*. 1974. 249 f. These présentée pour l'obtention du diplôme de Docteur de 3e cycle à l'Université de Paris VI.
- RAMDOHR, P. *The ore minerals and their intergrowths*. Oxford: Pergamon Press, 1969. 1174 p.
- RAMSDEN, A. R.; FRENCH, D. H. Routine trace-element capabilities of electron-microprobe analysis in mineralogical investigations: an empirical evaluation of performance using spectrochemical standard glasses. *Canadian Mineralogist*, v.28, p. 171-180, 1990.

- REDLICH, K. A. Die Typen der Magnesitlagerstätten. *Z. Prakt. Geol.* n. 17, p. 300-310. 1909 *apud* POHL, W.; SIEGL, W. Sediment-hosted magnesite deposits. In: WOLF, K. H. (Ed.) *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, Part IV*, v. 14. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., cap. X, p. 223-310, 1986.
- REED, S. J. B. *Electron microprobe analysis*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 326 p.
- REEDER, R. J. Crystal chemistry of the rhomboedral carbonates. In: REEDER, R. J. (Ed.) *Carbonates: Mineralogy and Chemistry* (Reviews in Mineralogy, v. 11). Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1983. cap. 1, p. 1-47.
- REYNOLDS JR., R. C. Principles of powder diffraction. In: BISH, D. L.; POST, J. E. (Editors) *Modern Powder Diffraction* (Reviews in Mineralogy, v. 20). Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1989. cap. 1, p. 1-17.
- ROEDDER, E. *Composition of fluid inclusions* (Data of Geochemistry, 6th ed., chapter JJ - Geological Survey Professional Paper 440-JJ). Washington, D.C.: U. S. Government Printing Office, 1972. 164 p.
- ROEDDER, E. *Fluid Inclusions* (Reviews in Mineralogy, v. 12). Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1984. 646 p.
- SAXE COBOURG-GOTHA, D. P. A. Fer oligiste especulair cristalisé de Bom Jesus dos Meiras, province de Bahia, Brésil. *Acad. Sci. Paris, Comptes Rendus*, v. 108, pp. 1069-1070, 1889.
- SCHROEDER, N. C. The genesis of the Turk magnesite deposits, Stevens County Washington. *Compass*, v. 26, n. 1, p. 37-46. 1948 *apud* DUNCAN, L. R.; McCracken, W. H. Magnesite and Magnesia. In CARR, D. D. (Ed). *Industrial Mineral and Rocks*, 6th ed. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1994. pp. 643-654.
- SHEILA, D. Thermal analysis studies on the decomposition of magnesite. *International Journal of Mineral Processing*, v. 37, p. 73-88, 1993.

- SIBLEY, D. F.; GREGG, J. M. Classification of dolomite rock textures. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 57, n. 6, p. 967-975, 1987.
- SIEDEL, P. Beiträge zur Kenntnis einiger Mineralien aus Villa do Bom Jesus dos Meiras, Brasilien : *Neues Jahrb., Beilage*-Band 38, pp. 759-804, 1914.
- SIEGFUS, S. S. Some geological features of the Washington magnesite deposits. *Engineering Mining Journal*, v. 124, n. 22, p. 853-856. 1927 apud DUNCAN, L. R.; McCracken, W. H. Magnesite and Magnesia. In CARR, D. D. (Ed). *Industrial Mineral and Rocks*, 6th ed. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1994. pp. 643-654.
- SKOOG, D. A.; LEARY, J. J. *Principles of instrumental analysis* - 4th ed. Orlando: Harcourt Brace College Publishers, 1992. 700 p.
- SMITH, D.G.W. Quantitative energy dispersive microanalysis. In: SMITH, D.G.W. (Ed.) *Short course in Microbeam Techniques*. (Short Course Handbook v. 1). Edmonton: Mineralogical Association of Canada, 1976. cap. 3, p. 63-106.
- SNYDER, R.L.; BISH, D.L. Quantitative analysis. In: BISH, D. L.; POST, J. E. (Editors) *Modern Powder Diffraction* (Reviews in Mineralogy, v. 20). Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1989. cap. 5, pp.101-144.
- SPENCER, D. R. F. Basic refractory raw materials. *Transactions and Journal of British Ceramic Society*, v. 71, n. 5, p. 123-134, 1972.
- STONE, R. L. Thermal analysis of magnesite at CO₂ pressures up to six atmospheres. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 37, n. 2. p. 46-47, 1954.
- STRUNZ, H.; NICKEL, E. H. *Strunz Mineralogical Tables. Chemical-Structural Mineral Classification System* – 9th ed. Stuttgart: Schweizerbart, 2001. 870 p.
- SUMÁRIO MINERAL 2003. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, [s.d]. Site da Internet acessado em 17 de março de 2004. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm_legis/SumarioMineral2003.pdf>

- TAYLOR, C. M.; RADTKE, A. S. Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis. *Economic Geology*, v. 60, p. 1306-1319, 1965.
- TREFFNER, W. S. Microstructure of Periclase. *J. Amer. Ceram. Soc.*, v. 47, n. 8, p. 401-409, August, 1964.
- UHLIG, J., 1915, Monazite von Bom Jesus dos Meiras, Provinz Bahia, Brasilien : *Centralbl. Min. Geol. U. Pal.*, Abt. B, pp. 38-44. 1915.
- USGS Mineral Commodity Summaries, January 2004: Magnesium compounds, p.100-101. Acessado em 29 de fevereiro de 2004. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/mgcommcs04.pdf>>.
- UYTENBOGAARDT, W.; BURKE, E. A. J. Tables for microscopic identification of ore minerals, 2nd rev. ed. New York: Dove Publications, Inc. 1985. 430 p.
- VELASCO, F.; PESQUERA, A.; ARCE, R.; OLMEDO, F. A contribution to the ore genesis of the magnesite deposit of Eugui, Navarra (Spain). *Mineralium Deposita*, 22, p. 33-41, 1987.
- YACOBI, B. G.; HOLT, D. B. Cathodoluminescence microscopy of inorganic solids. New York: Plenum Press, 1990. 292 p.
- ZEMANN, J. Crystal chemistry of magnesium carbonates and related compounds. In: MÖLLER, P. (Ed.) Magnesite: Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-Carbonates (Monograph Series on Mineral Deposits, n. 28). Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1989. cap. 8, pp. 241-257.

Dados biográficos do autor

Luís Rodrigues Armôa Garcia nasceu em 27 de julho de 1948 em Ponta Porã-MS, filho de Antônio Rodrigues Garcia e Emigdia Armôa Rodrigues Garcia. É casado com Maria de Fátima da Silva Garcia e tem quatro filhos, Cristiano, André, Izabel e Fernando.

Graduou-se em Engenharia Geológica pela Escola de Minas e Metalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, em dezembro de 1973.

Trabalhou na Superintendência de Tecnologia da Companhia Vale do Rio Doce, de janeiro de 1974 a dezembro de 1997, nas áreas de microscopia óptica e eletrônica, difratometria de raios-X e microanálise eletrônica.

Em 1998 obteve o título de Mestre em Engenharia Mineral pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, com a dissertação “Caracterização Mineralógica do Minério de Transição da Mina de Ouro de Igarapé Bahia, Pará”.

Atualmente é colaborador voluntário no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) e no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálises (LMA) do Consórcio Física, Geologia, Química-UFMG/ CDTN.

Anexo A

Microanálises de magnésitas

| | MgO | MnO | CaO | Al ₂ O ₃ | FeO | SiO ₂ | CO ₂ | Total | Amostra | Mineral |
|--------|-------|------|------|--------------------------------|------|------------------|-----------------|--------|---------|------------|
| PP-704 | 46,56 | 0,37 | 0,21 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 52,80 | 100,00 | PP-704A | mag branca |
| | 46,41 | 0,34 | 0,07 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 53,14 | 100,00 | PP-704B | mag branca |
| | 43,94 | 0,35 | 0,22 | 0,01 | 0,09 | 0,01 | 55,37 | 100,00 | PP-704B | mag branca |
| | 47,27 | 0,36 | 0,06 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 52,29 | 100,00 | PP-704B | mag branca |
| | 46,33 | 0,39 | 0,26 | 0,00 | 0,12 | 0,02 | 52,88 | 100,00 | PP-704B | mag branca |
| | 46,68 | 0,46 | 0,24 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 52,60 | 100,00 | PP-704B | mag branca |
| Média | 46,20 | 0,38 | 0,18 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 53,18 | 100,00 | | mag branca |
| DP | 1,15 | 0,04 | 0,09 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 1,11 | | 6 | |
| PP-704 | 46,01 | 0,32 | 0,23 | 0,01 | 0,16 | 0,03 | 53,25 | 100,00 | PP-704A | mag inc |
| | 45,74 | 0,38 | 0,31 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 53,49 | 100,00 | PP-704A | mag inc |
| | 45,83 | 0,39 | 0,30 | 0,00 | 0,12 | 0,01 | 53,35 | 100,00 | PP-704A | mag inc |
| | 46,64 | 0,34 | 0,23 | 0,00 | 0,17 | 0,01 | 52,61 | 100,00 | PP-704B | mag inc |
| | 46,46 | 0,35 | 0,17 | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 52,90 | 100,00 | PP-704B | mag inc |
| | 46,87 | 0,35 | 0,21 | 0,00 | 0,09 | 0,02 | 52,46 | 100,00 | PP-704B | mag inc |
| | 46,67 | 0,37 | 0,21 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 52,66 | 100,00 | PP-704B | mag inc |
| | 46,87 | 0,46 | 0,25 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 52,39 | 100,00 | PP-704B | mag inc |
| Média | 46,39 | 0,37 | 0,24 | 0,00 | 0,10 | 0,01 | 52,89 | 100,00 | | mag inc |
| DP | 0,46 | 0,04 | 0,05 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,42 | | 8 | |
| PP-704 | 46,15 | 0,29 | 0,08 | 0,00 | 0,19 | 0,01 | 53,29 | 100,00 | PP-704A | mag verm |
| | 46,10 | 0,29 | 0,12 | 0,00 | 0,62 | 0,00 | 52,86 | 100,00 | PP-704A | mag verm |
| | 46,00 | 0,40 | 0,20 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 53,37 | 100,00 | PP-704A | mag verm |
| | 47,22 | 0,41 | 0,30 | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 51,95 | 100,00 | PP-704A | mag verm |
| | 46,02 | 0,43 | 0,24 | 0,07 | 0,10 | 0,04 | 53,11 | 100,00 | PP-704B | mag verm |

| | | | | | | | | | | |
|--------|-------|------|------|------|------|------|-------|--------|---------|------------|
| | 46,62 | 0,44 | 0,23 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 52,66 | 100,00 | PP-704B | mag verm |
| | 46,46 | 0,51 | 0,20 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 52,81 | 100,00 | PP-704B | mag verm |
| Média | 46,37 | 0,40 | 0,19 | 0,01 | 0,16 | 0,01 | 52,86 | 100,00 | | mag verm |
| DP | 0,44 | 0,08 | 0,07 | 0,03 | 0,21 | 0,01 | 0,48 | | 7 | |
| PP-BGF | 46,82 | 0,04 | 0,19 | 0,00 | 0,18 | 0,02 | 52,75 | 100,00 | PP-BGFA | mag branca |
| | 46,81 | 0,06 | 0,21 | 0,00 | 0,18 | 0,01 | 52,74 | 100,00 | PP-BGFA | mag branca |
| | 46,79 | 0,08 | 0,20 | 0,00 | 0,19 | 0,00 | 52,74 | 100,00 | PP-BGFA | mag branca |
| | 47,19 | 0,08 | 0,19 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 52,35 | 100,00 | PP-BGFA | mag branca |
| | 46,39 | 0,08 | 0,21 | 0,00 | 0,19 | 0,02 | 53,11 | 100,00 | PP-BGFA | mag branca |
| Média | 46,80 | 0,07 | 0,20 | 0,00 | 0,19 | 0,01 | 52,74 | 100,00 | | mag branca |
| DP | 0,28 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,27 | | 5 | |
| PP-BGF | 46,86 | 0,05 | 0,20 | 0,00 | 0,18 | 0,03 | 52,68 | 100,00 | PP-BGFA | mag inc |
| | 46,82 | 0,06 | 0,20 | 0,00 | 0,15 | 0,00 | 52,77 | 100,00 | PP-BGFA | mag inc |
| | 46,84 | 0,08 | 0,22 | 0,00 | 0,18 | 0,01 | 52,67 | 100,00 | PP-BGFA | mag inc |
| Média | 46,84 | 0,06 | 0,20 | 0,00 | 0,17 | 0,01 | 52,70 | 100,00 | | mag inc |
| DP | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | | 3 | |
| PP-BGF | 46,96 | 0,04 | 0,14 | 0,00 | 0,18 | 0,01 | 52,67 | 100,00 | PP-BGFA | mag verm |
| PP-RGF | 46,64 | 0,11 | 0,23 | 0,00 | 0,19 | 0,01 | 52,82 | 100,00 | PP-RGFA | mag branca |
| | 46,51 | 0,14 | 0,25 | 0,00 | 0,23 | 0,00 | 52,87 | 100,00 | PP-RGFA | mag branca |
| Média | 46,57 | 0,13 | 0,24 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 52,84 | 100,00 | | mag branca |
| DP | 0,09 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,04 | | 2 | |
| PP-RGF | 46,28 | 0,17 | 0,22 | 0,03 | 0,17 | 0,00 | 53,12 | 100,00 | PP-RGFA | mag inc |
| | 46,58 | 0,19 | 0,24 | 0,00 | 0,19 | 0,01 | 52,79 | 100,00 | PP-RGFA | mag inc |
| | 45,59 | 0,20 | 0,27 | 0,03 | 0,21 | 0,05 | 53,65 | 100,00 | PP-RGFA | mag inc |
| | 47,21 | 0,08 | 0,12 | 0,00 | 0,24 | 0,01 | 52,34 | 100,00 | PP-RGFB | mag inc |
| | 46,63 | 0,11 | 0,19 | 0,01 | 0,25 | 0,01 | 52,79 | 100,00 | PP-RGFB | mag inc |
| | 46,76 | 0,18 | 0,23 | 0,00 | 0,24 | 0,00 | 52,58 | 100,00 | PP-RGFB | mag inc |

| | | | | | | | | | | |
|--------|-------|------|------|------|------|------|-------|--------|---------|------------|
| Média | 46,51 | 0,16 | 0,21 | 0,01 | 0,22 | 0,01 | 52,88 | 100,00 | | mag inc |
| DP | 0,54 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,46 | | 6 | |
| PP-RGF | 46,59 | 0,19 | 0,22 | 0,01 | 0,18 | 0,01 | 52,80 | 100,00 | PP-RGFA | mag verm |
| | 45,04 | 0,50 | 0,11 | 0,08 | 0,03 | 0,06 | 54,18 | 100,00 | PP-RGFA | mag verm |
| | 46,36 | 0,52 | 0,10 | 0,01 | 0,07 | 0,01 | 52,93 | 100,00 | PP-RGFA | mag verm |
| | 46,60 | 0,52 | 0,07 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 52,78 | 100,00 | PP-RGFA | mag verm |
| | 46,22 | 0,56 | 0,16 | 0,07 | 0,02 | 0,08 | 52,89 | 100,00 | PP-RGFA | mag verm |
| | 46,83 | 0,63 | 0,14 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 52,33 | 100,00 | PP-RGFA | mag verm |
| | 47,08 | 0,04 | 0,08 | 0,00 | 0,23 | 0,01 | 52,56 | 100,00 | PP-RGFB | mag verm |
| | 47,19 | 0,05 | 0,11 | 0,01 | 0,22 | 0,01 | 52,41 | 100,00 | PP-RGFB | mag verm |
| | 47,15 | 0,07 | 0,08 | 0,00 | 0,25 | 0,01 | 52,43 | 100,00 | PP-RGFB | mag verm |
| | 47,01 | 0,12 | 0,06 | 0,00 | 0,31 | 0,01 | 52,50 | 100,00 | PP-RGFB | mag verm |
| | 46,60 | 0,30 | 0,15 | 0,01 | 0,15 | 0,00 | 52,79 | 100,00 | PP-RGFB | mag verm |
| | 47,09 | 0,38 | 0,32 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 52,12 | 100,00 | PP-RGFB | mag verm |
| | 46,52 | 0,49 | 0,33 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 52,61 | 100,00 | PP-RGFB | mag verm |
| Média | 46,64 | 0,34 | 0,15 | 0,01 | 0,12 | 0,02 | 52,72 | 100,00 | | mag verm |
| DP | 0,57 | 0,22 | 0,09 | 0,03 | 0,10 | 0,02 | 0,50 | | 13 | |
| TJ | 46,46 | 0,03 | 0,19 | 0,00 | 0,11 | 0,01 | 53,20 | 100,00 | TJA | mag branca |
| | 46,39 | 0,05 | 0,19 | 0,00 | 0,09 | 0,01 | 53,27 | 100,00 | TJA | mag branca |
| | 46,60 | 0,05 | 0,20 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 53,05 | 100,00 | TJA | mag branca |
| | 47,52 | 0,05 | 0,22 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 52,11 | 100,00 | TJA | mag branca |
| | 46,71 | 0,05 | 0,21 | 0,00 | 0,11 | 0,01 | 52,91 | 100,00 | TJA | mag branca |
| | 46,42 | 0,06 | 0,23 | 0,00 | 0,11 | 0,02 | 53,16 | 100,00 | TJA | mag branca |
| | 46,64 | 0,08 | 0,20 | 0,01 | 0,08 | 0,01 | 52,99 | 100,00 | TJB | mag branca |
| | 46,72 | 0,08 | 0,18 | 0,00 | 0,10 | 0,01 | 52,91 | 100,00 | TJB | mag branca |
| | 46,47 | 0,09 | 0,23 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 53,13 | 100,00 | TJB | mag branca |
| | 46,16 | 0,10 | 0,19 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 53,47 | 100,00 | TJB | mag branca |
| | 46,66 | 0,05 | 0,20 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 53,01 | 100,00 | TJC | mag branca |
| | 46,83 | 0,05 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 53,06 | 100,00 | TJC | mag branca |
| | 46,33 | 0,07 | 0,24 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 53,33 | 100,00 | TJC | mag branca |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|--------|--------|------------|------------|
| | 46,76 | 0,08 | 0,26 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 52,86 | 100,00 | TJC | mag branca | |
| Média | 46,62 | 0,06 | 0,20 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 53,03 | 100,00 | | mag branca | |
| DP | 0,32 | 0,02 | 0,06 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,32 | | 14 | | |
| | TJ | 46,77 | 0,07 | 0,14 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 52,97 | 100,00 | TJC | mag inc |
| | | 46,55 | 0,09 | 0,26 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 53,05 | 100,00 | TJC | mag inc |
| Média | | 46,66 | 0,08 | 0,20 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 53,01 | 100,00 | | mag inc |
| DP | | 0,16 | 0,01 | 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | | 2 | |
| | TJ | 46,33 | 0,09 | 0,18 | 0,00 | 0,11 | 0,01 | 53,28 | 100,00 | TJB | mag verm |
| | | 46,61 | 0,09 | 0,21 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 52,99 | 100,00 | TJB | mag verm |
| | | 46,58 | 0,07 | 0,20 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 53,08 | 100,00 | TJC | mag verm |
| | | 46,90 | 0,11 | 0,26 | 0,00 | 0,06 | 0,02 | 52,65 | 100,00 | TJC | mag verm |
| Média | | 46,61 | 0,09 | 0,21 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 53,00 | 100,00 | | mag verm |
| DP | | 0,24 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,26 | | 4 | |
| | TPA | 47,05 | 0,05 | 0,19 | 0,00 | 0,07 | 0,01 | 52,62 | 100,00 | TPA | mag branca |
| | TP | 47,52 | 0,05 | 0,22 | 0,00 | 0,18 | 0,01 | 52,03 | 100,00 | TPA | mag inc |
| | | 47,09 | 0,05 | 0,20 | 0,01 | 0,08 | 0,01 | 52,57 | 100,00 | TPA | mag inc |
| | | 47,05 | 0,05 | 0,22 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 52,59 | 100,00 | TPA | mag inc |
| | | 47,10 | 0,06 | 0,27 | 0,00 | 0,09 | 0,01 | 52,48 | 100,00 | TPA | mag inc |
| | | 46,58 | 0,02 | 0,31 | 0,01 | 0,14 | 0,02 | 52,91 | 100,00 | TPB | mag inc |
| | | 46,80 | 0,03 | 0,19 | 0,00 | 0,19 | 0,02 | 52,78 | 100,00 | TPB | mag inc |
| | | 46,34 | 0,03 | 0,15 | 0,00 | 0,16 | 0,01 | 53,31 | 100,00 | TPB | mag inc |
| | | 46,45 | 0,04 | 0,20 | 0,00 | 0,16 | 0,01 | 53,14 | 100,00 | TPB | mag inc |
| | | 46,28 | 0,04 | 0,10 | 0,00 | 0,23 | 0,01 | 53,33 | 100,00 | TPB | mag inc |
| | | 46,65 | 0,05 | 0,16 | 0,00 | 0,19 | 0,02 | 52,93 | 100,00 | TPB | mag inc |
| Média | | 46,78 | 0,04 | 0,20 | 0,00 | 0,15 | 0,01 | 52,81 | 100,00 | | mag inc |
| DP | | 0,40 | 0,01 | 0,06 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,41 | | 10 | |
| | TP | 46,90 | 0,04 | 0,34 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 52,67 | 100,00 | TPA | mag verm |

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|--------|------|------------|
| | 46,97 | 0,04 | 0,22 | 0,00 | 0,06 | 0,01 | 52,70 | 100,00 | TPA | mag verm |
| | 47,12 | 0,05 | 0,17 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | 52,53 | 100,00 | TPA | mag verm |
| | 46,52 | 0,06 | 0,20 | 0,01 | 0,22 | 0,02 | 52,99 | 100,00 | TPB | mag verm |
| | 46,51 | 0,07 | 0,22 | 0,01 | 0,28 | 0,02 | 52,89 | 100,00 | TPB | mag verm |
| Média | 46,80 | 0,05 | 0,23 | 0,00 | 0,15 | 0,01 | 52,76 | 100,00 | | mag verm |
| DP | 0,28 | 0,01 | 0,06 | 0,00 | 0,10 | 0,01 | 0,18 | | 5 | |
| TPP | 46,19 | 0,34 | 0,07 | 0,00 | 0,33 | 0,01 | 53,06 | 100,00 | TPPA | mag branca |
| | 46,47 | 0,35 | 0,10 | 0,00 | 0,31 | 0,01 | 52,75 | 100,00 | TPPA | mag branca |
| | 45,93 | 0,40 | 0,21 | 0,00 | 0,33 | 0,02 | 53,11 | 100,00 | TPPA | mag branca |
| | 46,14 | 0,49 | 0,37 | 0,00 | 0,26 | 0,01 | 52,73 | 100,00 | TPPA | mag branca |
| | 46,13 | 0,53 | 0,07 | 0,00 | 0,39 | 0,01 | 52,86 | 100,00 | TPPB | mag branca |
| | 46,14 | 0,54 | 0,09 | 0,01 | 0,37 | 0,01 | 52,85 | 100,00 | TPPB | mag branca |
| | 46,04 | 0,55 | 0,14 | 0,00 | 0,19 | 0,02 | 53,07 | 100,00 | TPPB | mag branca |
| | 46,03 | 0,57 | 0,12 | 0,00 | 0,29 | 0,01 | 52,99 | 100,00 | TPPB | mag branca |
| Média | 46,13 | 0,47 | 0,15 | 0,00 | 0,31 | 0,01 | 52,93 | 100,00 | | mag branca |
| DP | 0,16 | 0,09 | 0,10 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,15 | | 8 | |
| TPP | 46,17 | 0,35 | 0,14 | 0,00 | 0,37 | 0,02 | 52,95 | 100,00 | TPPA | mag inc |
| | 46,59 | 0,40 | 0,24 | 0,00 | 0,34 | 0,01 | 52,42 | 100,00 | TPPA | mag inc |
| | 46,90 | 0,41 | 0,21 | 0,01 | 0,32 | 0,02 | 52,14 | 100,00 | TPPA | mag inc |
| | 46,05 | 0,44 | 0,21 | 0,00 | 0,55 | 0,01 | 52,75 | 100,00 | TPPB | mag inc |
| | 45,89 | 0,49 | 0,15 | 0,00 | 0,54 | 0,03 | 52,89 | 100,00 | TPPB | mag inc |
| | 45,67 | 0,56 | 0,16 | 0,00 | 0,79 | 0,00 | 52,82 | 100,00 | TPPB | mag inc |
| Média | 46,21 | 0,44 | 0,18 | 0,00 | 0,48 | 0,01 | 52,66 | 100,00 | | mag inc |
| DP | 0,46 | 0,07 | 0,04 | 0,00 | 0,18 | 0,01 | 0,32 | | 6 | |
| TPP | 46,48 | 0,29 | 0,04 | 0,00 | 0,52 | 0,02 | 52,65 | 100,00 | TPPA | mag verm |
| | 46,75 | 0,30 | 0,08 | 0,01 | 0,37 | 0,01 | 52,48 | 100,00 | TPPA | mag verm |
| | 46,37 | 0,34 | 0,08 | 0,00 | 0,31 | 0,01 | 52,88 | 100,00 | TPPA | mag verm |
| | 45,16 | 0,38 | 0,07 | 0,04 | 0,32 | 0,04 | 53,99 | 100,00 | TPPA | mag verm |
| | 46,00 | 0,40 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,01 | 53,03 | 100,00 | TPPA | mag verm |

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|--------|------|----------|
| | 46,14 | 0,44 | 0,30 | 0,00 | 0,33 | 0,01 | 52,78 | 100,00 | TPPA | mag verm |
| | 45,97 | 0,44 | 0,29 | 0,00 | 0,29 | 0,01 | 53,00 | 100,00 | TPPA | mag verm |
| | 46,13 | 0,49 | 0,39 | 0,00 | 0,37 | 0,00 | 52,61 | 100,00 | TPPA | mag verm |
| | 46,19 | 0,60 | 0,07 | 0,00 | 0,17 | 0,01 | 52,95 | 100,00 | TPPB | mag verm |
| | 46,16 | 0,68 | 0,19 | 0,00 | 0,18 | 0,01 | 52,79 | 100,00 | TPPB | mag verm |
| | 46,33 | 0,68 | 0,25 | 0,00 | 0,32 | 0,02 | 52,40 | 100,00 | TPPB | mag verm |
| Média | 46,15 | 0,46 | 0,19 | 0,01 | 0,31 | 0,01 | 52,87 | 100,00 | | mag verm |
| DP | 0,40 | 0,14 | 0,12 | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 0,43 | | 11 | |

Microanálises de hematita

| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | MgO | MnO | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Total | Comment |
|--------|--------------------------------|------------------|------|------|------------------|--------------------------------|--------|-----------|
| TPP | 0,04 | 0,01 | 0,13 | 0,12 | 0,36 | 99,19 | 99,85 | TPP-2 |
| | 0,05 | 0,00 | 0,10 | 0,06 | 0,33 | 98,56 | 99,10 | TPP-3 |
| | 0,16 | 0,00 | 0,65 | 0,05 | 2,30 | 97,32 | 100,48 | TPP-5 |
| | 0,16 | 0,06 | 0,66 | 0,07 | 2,32 | 95,91 | 99,18 | TPP-6 |
| | 0,07 | 0,00 | 0,23 | 0,04 | 0,70 | 98,91 | 99,95 | TPP-7 |
| | 0,06 | 0,03 | 0,07 | 0,02 | 0,18 | 99,46 | 99,82 | TPP-9 |
| | 0,08 | 0,05 | 0,12 | 0,05 | 0,56 | 98,88 | 99,73 | TPP-10 |
| Média | 0,09 | 0,02 | 0,28 | 0,06 | 0,97 | 98,32 | 99,73 | 7 |
| DP | 0,05 | 0,02 | 0,26 | 0,03 | 0,93 | 1,26 | | |
| PP-704 | 0,10 | 0,03 | 0,17 | 0,03 | 0,61 | 99,09 | 100,02 | PP-704A-1 |
| | 0,08 | 0,01 | 0,12 | 0,06 | 0,44 | 98,72 | 99,45 | PP-704A-2 |
| | 0,11 | 0,02 | 0,11 | 0,01 | 1,44 | 98,71 | 100,39 | PP-704A-3 |
| | 0,11 | 0,02 | 0,15 | 0,02 | 0,56 | 98,60 | 99,45 | PP-704A-4 |
| | 0,09 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 0,39 | 98,76 | 99,38 | PP-704A-5 |
| | 0,09 | 0,00 | 0,08 | 0,04 | 0,42 | 99,45 | 100,09 | PP-704A-6 |

| | | | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|--------|--------|---------------|
| | 0,08 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,51 | 99,43 | 100,11 | PP-704A-7 |
| | 0,16 | 0,09 | 0,18 | 0,03 | 1,10 | 98,17 | 99,72 | PP-704A-9 |
| | 0,11 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | 1,94 | 98,00 | 100,17 | PP-704A-10 |
| | 0,09 | 0,00 | 0,15 | 0,08 | 1,27 | 98,46 | 100,06 | PP-704A-11 |
| | 0,09 | 0,03 | 0,10 | 0,00 | 0,49 | 100,32 | 101,02 | PP-704A-12 |
| | 0,08 | 0,06 | 0,08 | 0,02 | 2,72 | 96,61 | 99,56 | PP-704A-13 |
| | 0,16 | 0,00 | 0,25 | 0,02 | 0,79 | 99,38 | 100,60 | PP-704A-14 |
| | 0,12 | 0,02 | 0,17 | 0,00 | 0,64 | 98,30 | 99,25 | PP-704A-15 |
| | 0,08 | 0,00 | 0,08 | 0,02 | 0,53 | 99,23 | 99,95 | PP-704A-16 |
| | 0,11 | 0,02 | 0,22 | 0,01 | 0,85 | 98,01 | 99,23 | PP-704A-17 |
| | 0,13 | 0,07 | 0,20 | 0,02 | 0,85 | 98,25 | 99,53 | PP-704A-18 |
| Média | 0,11 | 0,02 | 0,14 | 0,03 | 0,91 | 98,68 | 99,88 | 17 |
| DP | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,63 | 0,82 | | |
| TP | 0,09 | 0,01 | 0,16 | 0,00 | 0,61 | 98,31 | 99,17 | TP-A-1 |
| | 0,24 | 0,05 | 0,65 | 0,03 | 1,45 | 97,34 | 99,75 | TP-A 1 |
| | 0,13 | 0,04 | 0,69 | 0,07 | 1,71 | 96,82 | 99,46 | TP-A 4 |
| Média | 0,15 | 0,03 | 0,50 | 0,03 | 1,26 | 97,49 | 99,46 | 3 |
| DP | 0,08 | 0,02 | 0,29 | 0,04 | 0,58 | 0,76 | | |
| PP-RGF | 0,06 | 0,03 | 0,20 | 0,01 | 0,88 | 99,68 | 100,86 | PP-RGF-A 1 |
| | 0,06 | 0,03 | 0,26 | 0,04 | 1,30 | 98,75 | 100,44 | PP-RGF-A 4 |
| | 0,06 | 0,00 | 0,26 | 0,06 | 1,21 | 97,68 | 99,27 | PP-RGF-A 5 |
| Média | 0,06 | 0,02 | 0,24 | 0,04 | 1,13 | 98,71 | 100,19 | 3 |
| DP | 0,00 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,22 | 1,00 | | |
| TJ | 0,31 | 0,02 | 0,18 | 0,04 | 0,41 | 99,30 | 100,26 | TJ-B 1 |
| | 0,26 | 0,00 | 0,17 | 0,04 | 0,43 | 100,08 | 100,97 | TJ-B 2 |
| | 0,24 | 0,02 | 0,15 | 0,03 | 0,38 | 99,49 | 100,31 | TJ-B 3 |

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|--------|--------|---------|
| | 0,22 | 0,00 | 0,14 | 0,04 | 0,45 | 98,83 | 99,68 | TJ-B 4 |
| | 0,26 | 0,03 | 0,15 | 0,04 | 0,46 | 98,88 | 99,82 | TJ-B 5 |
| | 0,26 | 0,09 | 0,20 | 0,04 | 0,42 | 98,12 | 99,12 | TJ-B 6 |
| | 0,33 | 0,03 | 0,19 | 0,01 | 0,46 | 99,13 | 100,14 | TJ-B 7 |
| | 0,25 | 0,03 | 0,16 | 0,00 | 0,42 | 99,05 | 99,91 | TJ-B 8 |
| | 0,29 | 0,02 | 0,13 | 0,01 | 0,50 | 99,25 | 100,19 | TJ-B 9 |
| | 0,31 | 0,03 | 0,14 | 0,00 | 0,46 | 99,10 | 100,04 | TJ-B 10 |
| | 0,30 | 0,03 | 0,16 | 0,00 | 0,46 | 99,06 | 100,00 | TJ-B 11 |
| | 0,29 | 0,01 | 0,14 | 0,04 | 0,45 | 99,06 | 99,99 | TJ-B 12 |
| | 0,23 | 0,00 | 0,13 | 0,02 | 0,42 | 99,94 | 100,73 | TJ-B 13 |
| | 0,29 | 0,00 | 0,15 | 0,02 | 0,92 | 98,51 | 99,88 | TJ-B 14 |
| | 0,31 | 0,00 | 0,15 | 0,00 | 0,47 | 99,06 | 99,98 | TJ-B 15 |
| | 0,29 | 0,01 | 0,18 | 0,00 | 0,44 | 99,38 | 100,31 | TJ-B 16 |
| | 0,28 | 0,00 | 0,14 | 0,02 | 0,46 | 100,05 | 100,95 | TJ-B 17 |
| | 0,22 | 0,02 | 0,14 | 0,01 | 0,47 | 99,34 | 100,20 | TJ-B 18 |
| Média | 0,27 | 0,02 | 0,15 | 0,02 | 0,47 | 99,20 | 100,14 | 18 |
| DP | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,11 | 0,49 | | |

Microanálises de cloritas

| | MgO | MnO | CaO | Al₂O₃ | FeO | SiO₂ | H₂O | Total | Amostra |
|--------|------------|------------|------------|------------------------------------|------------|------------------------|-----------------------|--------------|----------------|
| PP-704 | 34,00 | 0,01 | 0,02 | 18,75 | 1,56 | 30,00 | 15,65 | 100,00 | PP-704A |
| | 34,81 | 0,00 | 0,02 | 19,33 | 1,51 | 28,96 | 15,37 | 100,00 | PP-704A |
| | 32,47 | 0,05 | 0,07 | 20,04 | 1,17 | 27,79 | 18,41 | 100,00 | PP-704A |
| | 31,18 | 0,06 | 0,03 | 16,97 | 1,28 | 28,50 | 21,98 | 100,00 | PP-704B |
| | 34,62 | 0,05 | 0,07 | 19,34 | 1,22 | 29,57 | 15,13 | 100,00 | PP-704B |
| | 33,98 | 0,03 | 0,01 | 19,50 | 1,20 | 29,56 | 15,73 | 100,00 | PP-704B |
| | 35,10 | 0,02 | 0,01 | 20,23 | 1,16 | 30,48 | 13,00 | 100,00 | PP-704B |

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|--------|---------|
| Média | 33,74 | 0,03 | 0,03 | 19,17 | 1,30 | 29,27 | 16,47 | 100,00 | |
| DP | 1,42 | 0,02 | 0,03 | 1,08 | 0,17 | 0,92 | 2,90 | | 7 |
| PP-RGFA | 35,51 | 0,01 | 0,01 | 15,21 | 1,40 | 30,75 | 17,11 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 35,66 | 0,02 | 0,02 | 16,03 | 1,72 | 31,80 | 14,76 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 35,57 | 0,01 | 0,01 | 15,75 | 1,66 | 32,90 | 14,10 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 35,39 | 0,03 | 0,01 | 15,46 | 1,49 | 31,56 | 16,06 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 34,37 | 0,04 | 0,07 | 17,81 | 2,01 | 30,12 | 15,60 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 36,11 | 0,01 | 0,04 | 16,62 | 1,48 | 31,36 | 14,39 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 34,73 | 0,03 | 0,03 | 16,63 | 1,68 | 31,48 | 15,42 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 34,05 | 0,00 | 0,02 | 17,86 | 2,06 | 29,05 | 16,97 | 100,00 | PP-RGFA |
| Média | 35,17 | 0,02 | 0,03 | 16,42 | 1,69 | 31,13 | 15,55 | 100,00 | |
| DP | 0,71 | 0,01 | 0,02 | 1,00 | 0,24 | 1,16 | 1,12 | | 8 |
| TJC | 33,38 | 0,01 | 0,05 | 22,21 | 1,02 | 27,47 | 15,86 | 100,00 | TJC |
| TPB | 34,44 | 0,01 | 0,04 | 18,43 | 0,45 | 31,48 | 15,16 | 100,00 | TPB |
| TPP | 35,30 | 0,03 | 0,01 | 18,26 | 1,27 | 29,14 | 16,00 | 100,00 | TPPA |
| | 35,55 | 0,01 | 0,01 | 17,85 | 1,03 | 29,53 | 16,02 | 100,00 | TPPA |
| | 34,89 | 0,03 | 0,01 | 17,70 | 1,30 | 28,97 | 17,11 | 100,00 | TPPA |
| | 35,09 | 0,03 | 0,01 | 17,82 | 1,18 | 29,26 | 16,61 | 100,00 | TPPA |
| | 34,65 | 0,03 | 0,01 | 17,54 | 1,14 | 28,77 | 17,86 | 100,00 | TPPA |
| | 35,30 | 0,02 | 0,02 | 17,83 | 0,84 | 28,76 | 17,23 | 100,00 | TPPA |
| | 35,47 | 0,03 | 0,01 | 17,36 | 0,78 | 28,91 | 17,44 | 100,00 | TPPA |
| | 35,00 | 0,05 | 0,01 | 17,29 | 1,21 | 28,06 | 18,38 | 100,00 | TPPA |
| | 35,26 | 0,04 | 0,02 | 17,94 | 1,33 | 27,52 | 17,89 | 100,00 | TPPA |
| | 35,14 | 0,00 | 0,01 | 18,37 | 1,35 | 27,59 | 17,55 | 100,00 | TPPA |
| Média | 35,17 | 0,03 | 0,01 | 17,80 | 1,14 | 28,65 | 17,21 | 100,00 | |
| DP | 0,27 | 0,01 | 0,01 | 0,35 | 0,20 | 0,69 | 0,80 | | 10 |

Microanálises de dolomitas

| | MgO | MnO | CaO | Al₂O₃ | FeO | SiO₂ | CO₂ | Total | Amostra |
|--------|------------|------------|------------|------------------------------------|------------|------------------------|-----------------------|--------------|----------------|
| PP-704 | 22,70 | 0,09 | 30,46 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 46,71 | 100,00 | PP-704B |
| | 21,99 | 0,11 | 30,69 | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 47,11 | 100,00 | PP-704B |
| Média | 22,34 | 0,10 | 30,58 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 46,91 | 100,00 | |
| DP | 0,50 | 0,01 | 0,16 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,29 | | 2 |
| PP-RGF | 22,77 | 0,03 | 31,89 | 0,00 | 0,12 | 0,00 | 45,18 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 22,10 | 0,00 | 31,09 | 0,02 | 0,08 | 0,00 | 46,71 | 100,00 | PP-RGFB |
| | 22,19 | 0,02 | 30,51 | 0,01 | 0,06 | 0,00 | 47,21 | 100,00 | PP-RGFB |
| Média | 22,35 | 0,02 | 31,16 | 0,01 | 0,09 | 0,00 | 46,37 | 100,00 | |
| DP | 0,36 | 0,02 | 0,69 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 1,06 | | 3 |
| TJ | 22,64 | 0,03 | 31,11 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 46,20 | 100,00 | TJA |
| | 23,09 | 0,03 | 31,19 | 0,01 | 0,12 | 0,00 | 45,56 | 100,00 | TJA |
| | 22,40 | 0,03 | 30,91 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 46,62 | 100,00 | TJC |
| | 22,20 | 0,02 | 31,09 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 46,65 | 100,00 | TJC |
| | 22,01 | 0,02 | 31,08 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 46,87 | 100,00 | TJC |
| | 22,02 | 0,02 | 30,43 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 47,42 | 100,00 | TJC |
| | 22,22 | 0,03 | 30,41 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 47,32 | 100,00 | TJC |
| | 22,36 | 0,03 | 30,50 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 47,09 | 100,00 | TJC |
| Média | 22,37 | 0,03 | 30,84 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 46,72 | 100,00 | |
| DP | 0,36 | 0,00 | 0,34 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,61 | | 8 |
| TP | 22,07 | 0,02 | 30,72 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 47,12 | 100,00 | TPA |
| | 22,23 | 0,00 | 30,47 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 47,27 | 100,00 | TPA |
| | 22,80 | 0,01 | 30,51 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 46,63 | 100,00 | TPA |
| | 22,97 | 0,02 | 31,52 | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 45,43 | 100,00 | TPA |
| | 22,16 | 0,05 | 29,81 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 47,97 | 100,00 | TPA |
| | 22,15 | 0,02 | 29,85 | 0,01 | 0,08 | 0,01 | 47,88 | 100,00 | TPB |
| Média | 22,40 | 0,02 | 30,48 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 47,05 | 100,00 | |

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|------|-------|------|------|------|-------|--------|------|
| DP | 0,38 | 0,02 | 0,63 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,94 | | 6 |
| TPP | 22,29 | 0,69 | 30,10 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 46,90 | 100,00 | TPPA |

Microanálises de talco

| | MgO | MnO | CaO | Al ₂ O ₃ | FeO | SiO ₂ | H ₂ O | Total | Amostra |
|--------|-------|------|------|--------------------------------|------|------------------|------------------|--------|---------|
| PP-704 | 30,63 | 0,03 | 0,06 | 0,54 | 0,11 | 61,72 | 6,92 | 100,00 | PP-704A |
| | 30,87 | 0,00 | 0,03 | 0,48 | 0,06 | 62,76 | 5,79 | 100,00 | PP-704A |
| | 31,31 | 0,01 | 0,00 | 0,27 | 0,09 | 62,85 | 5,47 | 100,00 | PP-704A |
| Média | 30,93 | 0,01 | 0,03 | 0,43 | 0,09 | 62,44 | 6,06 | 100,00 | |
| DP | 0,35 | 0,01 | 0,03 | 0,14 | 0,03 | 0,63 | 0,76 | | 3 |
| PP-BGF | 31,27 | 0,01 | 0,04 | 0,17 | 0,07 | 65,18 | 3,25 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,30 | 0,01 | 0,03 | 0,24 | 0,05 | 62,71 | 5,67 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 30,68 | 0,00 | 0,04 | 0,20 | 0,07 | 63,71 | 5,31 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 32,57 | 0,00 | 0,03 | 0,26 | 0,08 | 63,50 | 3,56 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,43 | 0,00 | 0,05 | 0,20 | 0,05 | 64,66 | 3,61 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 30,26 | 0,01 | 0,06 | 0,21 | 0,07 | 61,64 | 7,76 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,29 | 0,01 | 0,02 | 0,17 | 0,07 | 63,68 | 4,76 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,02 | 0,00 | 0,01 | 0,11 | 0,06 | 63,45 | 5,35 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,88 | 0,00 | 0,02 | 0,29 | 0,05 | 62,78 | 4,98 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,14 | 0,01 | 0,02 | 0,24 | 0,08 | 61,80 | 6,71 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 32,87 | 0,00 | 0,05 | 0,17 | 0,06 | 64,50 | 2,35 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,76 | 0,01 | 0,06 | 0,22 | 0,06 | 60,77 | 7,13 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 32,59 | 0,02 | 0,00 | 0,15 | 0,06 | 63,76 | 3,44 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,30 | 0,00 | 0,08 | 0,23 | 0,08 | 63,14 | 5,18 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 30,91 | 0,02 | 0,04 | 0,20 | 0,04 | 62,37 | 6,43 | 100,00 | PP-BGFA |

| | | | | | | | | | |
|--------|-------|------|------|------|------|-------|------|--------|---------|
| | 31,29 | 0,01 | 0,01 | 0,31 | 0,08 | 63,30 | 4,99 | 100,00 | PP-BGFA |
| | 31,42 | 0,00 | 0,02 | 0,21 | 0,08 | 64,69 | 3,58 | 100,00 | PP-BGFA |
| Média | 31,47 | 0,01 | 0,03 | 0,21 | 0,06 | 63,27 | 4,94 | 100,00 | |
| DP | 0,69 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,01 | 1,18 | 1,51 | | 17 |
| PP-RGF | 31,21 | 0,00 | 0,03 | 0,13 | 0,08 | 61,94 | 6,62 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 31,32 | 0,02 | 0,03 | 0,14 | 0,09 | 61,64 | 6,77 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 31,91 | 0,01 | 0,02 | 0,10 | 0,05 | 61,16 | 6,75 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 31,56 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 61,63 | 6,66 | 100,00 | PP-RGFA |
| | 31,40 | 0,02 | 0,01 | 0,08 | 0,10 | 61,91 | 6,48 | 100,00 | PP-RGFA |
| Média | 31,48 | 0,01 | 0,02 | 0,10 | 0,08 | 61,65 | 6,66 | 100,00 | |
| DP | 0,27 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,31 | 0,12 | | 5 |
| TJ | 31,78 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,05 | 61,55 | 6,53 | 100,00 | TJA |
| | 31,90 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,06 | 62,10 | 5,87 | 100,00 | TJA |
| | 31,70 | 0,00 | 0,01 | 0,06 | 0,06 | 60,61 | 7,56 | 100,00 | TJA |
| | 30,90 | 0,04 | 0,06 | 0,46 | 0,06 | 60,40 | 8,07 | 100,00 | TJA |
| | 31,65 | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 61,59 | 6,63 | 100,00 | TJA |
| | 31,64 | 0,01 | 0,00 | 0,09 | 0,02 | 61,71 | 6,54 | 100,00 | TJA |
| | 31,18 | 0,02 | 0,02 | 0,08 | 0,05 | 61,89 | 6,76 | 100,00 | TJA |
| | 30,85 | 0,01 | 0,05 | 0,23 | 0,08 | 60,07 | 8,73 | 100,00 | TJB |
| | 30,90 | 0,01 | 0,06 | 0,25 | 0,08 | 61,55 | 7,15 | 100,00 | TJB |
| | 30,97 | 0,03 | 0,04 | 0,18 | 0,10 | 62,67 | 6,02 | 100,00 | TJB |
| | 30,94 | 0,00 | 0,05 | 0,94 | 0,19 | 61,91 | 5,97 | 100,00 | TJB |
| | 30,20 | 0,01 | 0,04 | 0,29 | 0,07 | 60,91 | 8,48 | 100,00 | TJC |
| | 31,57 | 0,00 | 0,03 | 0,68 | 0,10 | 60,78 | 6,85 | 100,00 | TJC |
| Média | 31,24 | 0,01 | 0,03 | 0,27 | 0,08 | 61,36 | 7,01 | 100,00 | |
| DP | 0,50 | 0,01 | 0,02 | 0,27 | 0,04 | 0,75 | 0,94 | | 13 |
| TP | 30,87 | 0,01 | 0,04 | 0,14 | 0,05 | 63,75 | 5,15 | 100,00 | TPB |
| | 30,20 | 0,00 | 0,07 | 0,31 | 0,06 | 61,73 | 7,64 | 100,00 | TPB |
| | 31,22 | 0,01 | 0,03 | 0,37 | 0,04 | 62,02 | 6,30 | 100,00 | TPB |

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|--------|-----|
| | 30,80 | 0,00 | 0,02 | 0,21 | 0,07 | 61,22 | 7,68 | 100,00 | TPB |
| | 31,63 | 0,00 | 0,04 | 0,29 | 0,04 | 61,29 | 6,70 | 100,00 | TPB |
| | 30,56 | 0,02 | 0,06 | 0,37 | 0,06 | 60,17 | 8,78 | 100,00 | TPB |
| | 30,26 | 0,00 | 0,04 | 0,37 | 0,04 | 60,00 | 9,30 | 100,00 | TPB |
| Média | 30,79 | 0,00 | 0,04 | 0,29 | 0,05 | 61,45 | 7,36 | 100,00 | |
| DP | 0,52 | 0,01 | 0,02 | 0,09 | 0,01 | 1,26 | 1,44 | | 7 |

ANEXO B

Derbylite

Formula: $(\text{Fe},\text{Fe},\text{Ti})_7 \text{SbO}_{13}(\text{OH})$

System: Monoclinic

Hardness: 5

| Classification of Derbylite | |
|-----------------------------|--|
| IMA status: | Approved |
| Strunz ID: | 4/C.23-30 4 : Oxides & Hydroxides C : Oxides with metal : oxygen = 2:3 (M ₂ O ₃ and related compounds) 23 : Hemloite - Derbylite series |
| Hey's CIM Ref.: | 24.3.2 |
| mindat.org URL: | http://www.mindat.org/min-1263.html |

| Type Occurrence of Derbylite | |
|----------------------------------|---|
| Type Locality: | Tripuhy (Fazenda Tres Cruzes, Tripui), Ouro Preto, Minas Gerais, Southeast Region, Brazil |
| Year of Discovery: | 1895 |
| Physical Properties of Derbylite | |
| Hardness (Mohs') | 5 |

| Crystallography of Derbylite | |
|------------------------------|--|
| Crystal System: | Monoclinic |
| Cell Parameters: | a = 7.15, b = 14.35, c = 4.98 β=104.69° |
| Ratio: | a:b:c = 0.498 : 1 : 0.347 |

| Relationship of Derbylite to other Species | | | |
|---|-----------|------------|---|
| Related Minerals (Strunz Grouping): | 4/C.23-10 | Hemloite | $(\text{As,Sb})_2(\text{Ti,V,Fe,Al})_{12}\text{C}_{23}\text{OH}$ |
| | 4/C.23-15 | Graeserite | $(\text{Fe}^{3+},\text{Ti})_4\text{Ti}_3\text{AsO}_{13}(\text{OH})$ |
| | 4/C.23-20 | Tomichite | $(\text{V,Fe})_2\text{Ti}_3\text{AsO}_{13}\text{OH}$ |

| Chemical Properties of Derbylite | |
|---|---|
| Formula: | $(\text{Fe,Fe,Ti})_7\text{SbO}_{13}(\text{OH})$ |
| Elements: | Sb, Fe, H, O, Ti |

Localities: (TL) indicates type locality. ? indicates doubtful locality. All other localities listed without reference should be considered as unproven until references can be found.

| | |
|---------------|---|
| Brazil | Southeast Region Minas Gerais Ouro Prêto Tripuhy (Fazenda Tres Cruzes (TL)) |
| Italy | Tuscany Lucca Province Apuan Alps Versilia Stazzema (Ponte Stazzemese) Buca della Vena Mine |

Fonte: Mineral Database (2004) <<http://www.mindat.org/min-1263.html>>

ANEXO C

Definições utilizadas para Cálculo de Recursos e Reservas Minerais

Recurso Mineral é uma concentração ou depósito na crosta da Terra, de material natural, sólido, em quantidade e teor e/ou qualidades tais que, uma vez pesquisado, exhibe parâmetros mostrando, de modo razoável, que seu aproveitamento econômico é factível na atualidade ou no futuro.

Recurso Mineral Indicado é a parte do Recurso Mineral para a qual a tonelagem ou volume, o teor e/ou qualidades, conteúdo mineral, morfologia, continuidade e parâmetros físicos estão estabelecidos, de modo que as estimativas realizadas são confiáveis. Envolve pesquisa com amostragem direta em estações (afloramentos, trincheiras, poços, galerias e furos de sonda), adequadamente espaçadas.

Recurso Mineral Medido é a parte do Recurso Mineral para a qual a tonelagem ou volume, o teor e/ou qualidades, conteúdo mineral, morfologia, continuidade e parâmetros físicos são estabelecidos com elevado nível de confiabilidade. As estimativas são suportadas por amostragem direta em retículo denso (afloramentos, trincheiras, poços, galerias e furos de sonda), de modo que se comprova a permanência das propriedades.

Retículo é a malha da amostragem a 3D. “Retículo denso” é uma malha ajustada para a densidade de exploração adequada à fase da pesquisa mineral em que se está e para o tipo de depósito em estudo.

Reserva Mineral é a parte do recurso mineral para a qual demonstra-se viabilidade técnica e econômica para produção. Essa demonstração inclui considerações sobre elementos modificadores, tais como fatores de lavra e beneficiamento, de economia e mercado, legais, ambientais e sociais, justificando-se a avaliação, envolvendo análise de lucratividade, em um dado tempo.

Reserva Mineral Indicada é a parcela economicamente lavrável do Recurso Mineral Indicado e, mais raramente, do Recurso Mineral Medido, para a qual a viabilidade técnica e econômica foi demonstrada; inclui perdas (e diluição) com a lavra e o beneficiamento. Avaliações apropriadas, além da viabilidade técnica e econômica, são efetuadas compreendendo elementos modificadores, tais como

fatores legais, ambientais e sociais. As avaliações são demonstradas para a época em que se reportam as reservas e razoavelmente justificadas.

Reserva Mineral Medida é a parcela economicamente lavrável do Recurso Mineral Medido, incluindo perdas (e diluição) com a lavra e o beneficiamento, para a qual a viabilidade técnica e econômica encontra-se tão bem estabelecida que há alto grau de confiabilidade nas conclusões. Os estudos abrangem análises dos diversos elementos modificadores (tais como lavra, metalurgia, economia e mercado, fatores legais, ambientais e sociais) e demonstram que, na época em que se reportaram as reservas, sua extração era claramente justificável, bem como adequadas as hipóteses adotadas para investimentos.

Extraído de:

Guia Prático para Cálculo de Recursos e Reservas Minerais

J. Grossi e Jorge Valente, com contribuições de Elpídio Reis, Ronald Fletcher, Vitor Hugo Castro e outros. Versão Primeira – Junho de 2003

<<http://www.geologo.com.br/JORC.ASP>> acessado em 13/03/2004.