



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**Programa de Pós-graduação em Geologia**



**DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO**

**CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE  
AGALMATOLITO DA SERRA DOS FERREIRAS,  
ONÇA DE PITANGUI-MG.**

**Paulo Roberto Secco**

**Nº 98**

**Belo Horizonte**

**23/04/09**

**PAULO ROBERTO SECCO**

**CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE  
AGALMATOLITO DA SERRA DOS FERREIRAS,  
ONÇA DE PITANGUI-MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Orientador: Prof. Antônio Wilson Romano.

**Belo Horizonte**

**Instituto de Geociências – UFMG**

**23/04/09**

*Aos meus pais, Juvenal e Mathilde (in memoriam),  
pelas lições de vida e carinho;  
à minha companheira, Maria José,  
e aos meus filhos, Fabiana, Henrique e Renata,  
pelo apoio em todos os momentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e, em especial, ao orientador, Professor e amigo Antônio Wilson Romano, pela valiosa orientação, pelo incentivo e sugestões na estruturação da dissertação.

À comissão examinadora, nas pessoas dos professores Dr<sup>a</sup>. Lydia Maria Lobato e Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão, pelas valiosas críticas e sugestões emitidas, as quais foram consideradas na revisão do texto.

À Magnesita Refratários S.A., nas pessoas do Engenheiro Luis Rodolfo Mariani Bittencourt, pela autorização na participação no Curso de Pós-Graduação em Geologia no Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG); e Engenheiro Arnaldo Lentini, pela coordenação e elaboração dos ensaios tecnológicos das amostras de agalmatolito e discussões dos resultados. Aos setores da Magnesita Refratários S.A, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD), em especial ao técnico Fábio Vieira Filho. À Gerência de Mineração (GMI), em especial à técnica Maria de Lourdes Campos Soares.

Aos funcionários do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa do Instituto de Geociências (UFMG), pelos diversos favores prestados.

À Professora Magda Barbosa Roquette de Pinho Taranto, pela revisão minuciosa do trabalho.

Aos geólogos Gabriel Henrique Lima Araújo, Kessiane Lima Silva, Maria Letícia Parlato Granito e Rodrigo Otávio Gontijo Cardoso, pela colaboração nos trabalhos preliminares de campo e de laboratório.

## RESUMO

O agalmatolito é uma rocha bastante peculiar, que ocorre especificamente na faixa Mateus Leme – Pará de Minas – Onça de Pitangui – Pitangui. Trata-se de uma rocha metamórfica formada pela alteração hidrotermal de diversos protólitos. É constituída principalmente pelo filossilicato de alumínio – pirofilita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), em associação com muscovita, caulinita, diásporo, cianita, turmalina, quartzo e feldspato. Sua forma de ocorrência geológica é considerada rara e se apresenta nas formas maciça e lamelar. Sua aplicação industrial está relacionada aos seus atributos químicos, físicos e mineralógicos, que estão diretamente relacionados à presença de determinados minerais acessórios. Este trabalho foi realizado com o objetivo de se obter melhor conhecimento dos agalmatolitos da Serra dos Ferreiras, município de Onça de Pitangui-MG. Trata-se de um depósito que vem sendo explorado desde a década de 1960, cuja única aplicação, até o momento, é como insumo na fabricação de refratários sílico-aluminosos. A partir da década de 1980, com o desenvolvimento tecnológico e a utilização de matérias-primas minerais alternativas, o que possibilitou a elaboração de produtos refratários sílico-aluminosos de alta performance, o agalmatolito teve, conseqüentemente, o seu uso drasticamente diminuído. Além do mapeamento geológico do depósito, foram realizados testes de caracterização físico-química e mineralógica nos principais tipos de agalmatolito, evidenciando-se sempre suas aptidões para as diversas aplicações industriais. As técnicas utilizadas na caracterização foram: análises geoquímicas, fluorescência de raios-X, difração de raios-X, microscopia e ensaios físicos. Os resultados foram comparados com os agalmatolitos da região de Mateus Leme – Pará de Minas, que são utilizados desde a década de 1940 exclusivamente como cargas minerais para a indústria. Esses estudos mostram que os tipos cujas propriedades mais se aproximam dos utilizados como cargas minerais são: o muscovita-xisto (agalmatolito canjica, termo usado na mina) e o muscovita-quartzo-agalmatolito (agalmatolito tipo micado, termo usado na mina). Neste estudo foram selecionados e estudados apenas os tipos que apresentam recursos geológicos suficientes para que o empreendedor possa investir em estudos tecnológicos no desenvolvimento de produtos que atendam o mercado por longo prazo.

**Palavras-chave:** Agalmatolito. Minerais industriais. Pirofilita. Rochas peraluminosas.

## ABSTRACT

Agalmatolite is a very peculiar rock that occurs specifically in the region of Mateus Leme-Pará de Minas-Onça de Pitangui-Pitangui. It is a metamorphic rock formed by the hydrothermal alteration of several protolites. It is mostly composed by the phyllosilicate of alumina – pyrophyllite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), associated to muscovite, caulinite, diaspore, cyanite, tourmaline, quartz, feldspar. Its geological occurrence is considered rare and it occurs in the massive and lamellar forms. Its industrial application is related to its chemical, physical and mineralogical properties that are directly related to the presence of some accessory minerals. This dissertation was carried out with the purpose of achieving better information about the agalmatolites from Serra dos Ferreiras, Onça de Pitangui-MG. It deals with a deposit that has been exploited since the 1960's decade, whose application so far is as raw material in the manufacture of refractory silico-aluminous products. Starting from the 1980's decade, with the technological development and the use of alternative raw materials, which made possible the production of high performance silico-aluminous refractory products, the agalmatolite had a consequent reduction of its use. Besides the deposit geological mapping, physico-chemical and mineralogical characterization tests have been performed on the main types of agalmatolite, always with the evidence of its several industrial applications. The techniques used for the characterization were as follows: geochemical analysis, X-rays fluorescence, X-ray diffraction, microscopy and physical tests. The results were compared with the agalmatolites in the Mateus Leme-Pará de Minas region, which have been used since the 1940's decade exclusively as mineral fillers for the industry. These studies show that the types whose properties are most similar to those used as mineral fillers are as follows: muscovite-schist (Canjica agalmatolite, term used in the mine) and muscovite-quartz agalmatolite (mikado agalmatolite type, term used in the mine). This study has selected and studied just the types that present enough geological reserves so as the entrepreneur may invest on technological studies for the development of products that have market applications in the long term.

**Key-words:** Agalmatolite. Industrial minerals. Pyrophyllite. Peraluminous rocks.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPpQ	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
CPE	Cone pirométrico equivalente
CPMTC	Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
DRX	Difração de raios-X
EUA	Estados Unidos da América
FCA	<i>Free carrier</i>
FRX	Fluorescência de raios-X
GMI	Gerência de Mineração
IC	Índice cromático
ICDD	<i>International Center for Diffraction Data</i>
IGC	Instituto de Geociências
IMA	<i>International Mineralogical Association</i>
Kbar	Unidade de pressão
MO	Microscopia óptica
MRI	Minerais e rochas industriais
µm	Micrômetro
NBR	Normas brasileiras de referência
NE	Nordeste
NW	Noroeste
°C	graus <i>Celsius</i>
PF	Perda ao fogo
PVC	Polímero termoplástico
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
TGs	Trabalho geológico de graduação
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Figuras

FIGURA 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	19
FIGURA 2 - Grau de complexidade e de diversidade que caracteriza os estudos e os negócios com os minerais e rochas industriais.....	24
FIGURA 3 - Estrutura cristalina da pirofilita.....	28
FIGURA 4 - Produção mundial de pirofilita em 2000.....	31
FIGURA 5 - Foto da Frente de Lavra Lamelar, da Serra dos Ferreiras.....	38
FIGURA 6 - Fluxograma simplificado das operações da mina na Serra dos Ferreiras.	39
FIGURA 7 - Esboço geológico da região do Quadrilátero Ferrífero–MG.....	41
FIGURA 8 - Lineamento Pitangui e as principais zonas de cisalhamento associadas..	50
FIGURA 9 - Fotos do metatufo.....	53
FIGURA 10 - Foto dos nódulos peraluminosos no agalmatolito.....	56
FIGURA 11 - Fluxograma das técnicas utilizadas nas caracterizações química e mineralógica.....	59
FIGURA 12 - Fluxograma das técnicas utilizadas nos ensaios tecnológicos.....	62
FIGURA 13 - Foto da amostra típica do pirofilita- <i>fels (roseki)</i> .....	66
FIGURA 14 - Foto da amostra típica do pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (B1)..	66
FIGURA 15 - Foto da amostra típica do muscovita-pirofilita-agalmatolito (esverdeado).....	67
FIGURA 16 - Foto da amostra típica do quartzito pirofilítico com cloritoide (chumbinho).....	68
FIGURA 17 - Foto da amostra típica do muscovita xisto (canjica).....	68
FIGURA 18 - Foto da amostra típica do muscovita-quartzo-agalmatolito (micado)....	69
FIGURA 19 - Difratoograma da amostra de agalmatolito <i>roseki</i> .....	72
FIGURA 20 - Difratoograma da amostra de agalmatolito B1.....	73
FIGURA 21 - Difratoograma da amostra de agalmatolito esverdeado.....	73
FIGURA 22 - Difratoograma da amostra de agalmatolito canjica.....	74
FIGURA 23 - Difratoograma da amostra de agalmatolito micado.....	74
FIGURA 24 - Difratoograma da amostra de agalmatolito chumbinho.....	75
FIGURA 25 - Difratoograma da amostra de agalmatolito de Mateus Leme.....	75

FIGURA 26 - Difratoograma para a amostra de agalmatolito de Mateus Leme no analisador <i>Malvern</i> .....	77
FIGURA 27 - Foto da amostra de pirofilita- <i>fels</i> .....	93
FIGURA 28 - Microfotografias dos fenocristais de quartzo imersos em matriz pirofilítica.....	94
FIGURA 29 - Foto da amostra de pirofilita-cianita-diásporo.....	95
FIGURA 30 - Microfotografias, reação de reequilíbrio cianita → pirofilita + diásporo.....	95
FIGURA 31 - Foto da amostra de muscovita-pirofilita-agalmatolito.....	96
FIGURA 32 - Microfotografias: massa de agregados finos de clorita, muscovita e pirofilita com cristais diminutos de rutilo disseminados.....	96
FIGURA 33 - Foto da amostra de quartzito-pirofilítico com cloritoide.....	97
FIGURA 34 - Microfotografias: fenocristais de quartzo e cristais de cloritoide imersos em matriz pirofilítica.....	97
FIGURA 35 - Foto da amostra de muscovita xisto.....	98
FIGURA 36 - Microfotografias: mineral de forma idiomórfica substituído por muscovita e ligeiramente rotacionado.....	98
FIGURA 37 - Foto de muscovita-quartzo-agalmatolito.....	99
FIGURA 38 - Microfotografias: massa de muscovita com hidróxido de ferro ao longo da foliação.....	99

## **Gráficos**

GRÁFICO 1 - Distribuição da produção mundial de pirofilita em 2000.....	30
GRÁFICO 2 - Correlação $Al_2O_3$ x $TiO_2$ para os agalmatolitos da Serra dos Ferreiras..	70

## **Quadros**

QUADRO 1 - Distâncias e rumos dos limites da área.....	18
QUADRO 2 - Minerais e rochas industriais <i>versus</i> aplicações.....	25
QUADRO 3 - Classificação de materiais refratários sílico-aluminosos com base em análises químicas (ABNT, NBR 10.239/1996).....	33
QUADRO 4 - Coluna litoestratigráfica da região.....	45
QUADRO 5 - Principais especificações para cargas minerais.....	83
QUADRO 6 - Resumo dos resultados dos ensaios tecnológicos.....	84

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Agalmatolitos da Serra dos Ferreiras.....	70
TABELA 2 - Resultados das análises químicas dos tipos de agalmatolito em estudo..	71
TABELA 3 - Peso específico dos tipos de agalmatolito estudados.....	76
TABELA 4 - Determinação de tamanho médio das partículas.....	76
TABELA 5 - Determinação de área superficial específica.....	78
TABELA 6 - Índices de brancura e cromático dos agalmatolitos.....	78
TABELA 7 - Agalmatolito Lamil micro-ex (coletado na PPG Ind. do Brasil – Tintas e Vernizes Ltda.).....	79
TABELA 8 - Agalmatolito Lamil 500 e 325 (coletado na Minérios Ouro Branco Ltda).....	80
TABELA 9 - Agalmatolito Lamil 500 e 325 (coletado na Minérios Ouro Branco Ltda).....	81
TABELA 10 - Principais especificações dos agalmatolitos para refratários sílico-aluminosos.....	82
TABELA 11 - Resumo dos recursos geológicos dos tipos estudados.....	85

## LISTA DOS MINERAIS REFERIDOS NO TEXTO

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula cristaloquímica</b>	<b>Sistema cristalino</b>
Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Triclínico
Cianita	$\text{Al}_2[\text{O} \text{SiO}_4]$	Triclínico
Coríndon	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Hexagonal
Diásporo	$\text{AlO}(\text{OH})$	Ortorrômico
Muscovita	$\text{KA}_2[(\text{OH})_2 \text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	Monoclinico
Pirofilita	$\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Monoclinico
Quartzo	$\text{SiO}_2$	Trigonal
Rutilo	$\text{TiO}_2$	Tetragonal
Talco	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Monoclínico ou triclínico

Todas as fórmulas cristaloquímicas foram encontradas em <http://www.mindat.org> e os nomes dos minerais são aprovados e recomendados pela *International Mineralogical Association* (IMA).

# SUMÁRIO<sup>1</sup>

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Localização da área de estudo.....	18
1.2 Aspectos fisiográficos.....	19
2 OBJETIVOS.....	21
2.1 Objetivo geral.....	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1 Definições de minerais e rochas industriais (MRI).....	22
3.2 Definições de agalmatolito.....	26
3.3 Aspectos geológicos dos depósitos de agalmatolitos.....	28
3.4 Produção mundial de pirofilita (agalmatolito).....	30
3.5 Aplicações industriais.....	32
3.5.1 Refratários sílico-aluminosos.....	32
3.5.2 Tintas.....	33
3.5.3 Plásticos.....	34
3.5.4 Cerâmica.....	34
3.5.5 Celulose e papel.....	35
3.5.6 Borrachas e elastômeros.....	35
3.5.7 Sabões, detergentes e outros produtos químicos.....	35
3.5.8 Cosméticos.....	36
3.5.9 Outros usos.....	36
3.5.10 Minerais industriais alternativos.....	37
3.6 Método de lavra.....	37
4 GEOLOGIA REGIONAL.....	40
4.1 Introdução.....	40
4.2 Trabalhos anteriores.....	42
4.3 Litoestratigrafia.....	44

---

<sup>1</sup> Este trabalho foi revisado de acordo com as novas regras ortográficas.

4.3.1 Embasamento cratônico.....	44
4.3.2 Supergrupo Rio das Velhas.....	46
4.3.3 Granitoides.....	47
4.3.4 Diques básicos.....	48
4.3.5 Grupo Bambuí.....	48
4.4 Contexto tectônico.....	49
5 TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA DE ESTUDO.....	51
5.1 Metodologia.....	51
5.2 Geologia local.....	51
5.2.1 Litoestratigrafia.....	52
5.3 Reavaliação geológica do depósito da Serra dos Ferreiras.....	56
5.3.1 Metodologia.....	56
5.3.2 Agalmatolitos da Serra dos Ferreiras.....	57
5.4 Metodologia usada na caracterização química e mineralógica dos agalmatolitos.....	58
5.4.1 Preparação das amostras para os ensaios.....	59
5.4.2 Microscopia óptica (MO).....	59
5.4.3 Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX).....	60
5.4.4 Análises químicas por fluorescência de raios-X (FRX).....	60
5.4.5 Perdas ao fogo (PF).....	61
5.4.6 Composição química em base calcinada.....	61
5.5 Metodologia usada nos ensaios tecnológicos preliminares dos agalmatolitos.....	61
5.5.1 Britagem.....	62
5.5.2 Moagem.....	62
5.5.3 Análises químicas por FRX e perdas ao fogo (PFs).....	63
5.5.4 Análise mineralógica por DRX.....	63
5.5.5 Massa específica.....	63
5.5.6 Análise granulométrica dos particulados – <i>Malvern</i> .....	64
5.5.7 Área superficial específica - BET ( $m^2/g$ ).....	64
5.5.8 Índices de brancura e índice cromático.....	64
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
6.1 Principais tipos de agalmatolito.....	65
6.1.1 Pirofilita- <i>fels</i> ( <i>armh1</i> ).....	65

6.1.2 Pirofilita-muscovita-cianita-diasporito ( <i>arnmha2</i> ).....	66
6.1.3 Muscovita-pirofilita-agalmatolito ( <i>arnmha3</i> ).....	67
6.1.4 Quartzito-pirofilítico com cloritoide ( <i>arnmha4</i> ).....	67
6.1.5 Muscovita-xisto ( <i>arnmha5</i> ).....	68
6.1.6 Muscovita-quartzo-agalmatolito ( <i>arnmha6</i> ).....	69
6.2 Análises químicas.....	69
6.2.1 Análises químicas de diversos tipos de agalmatolito da Serra dos Ferreiras.....	69
6.2.2 Análises químicas dos tipos de agalmatolito selecionados para os ensaios tecnológicos.....	71
6.3 Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX).....	72
6.4 Massa específica.....	76
6.5 Análise granulométrica dos particulados – <i>Malvern</i> .....	76
6.6 Área superficial específica - BET (m <sup>2</sup> /g).....	77
6.7 Índices de brancura e índice cromático.....	78
6.8 Caracterização de amostras de diversos produtos de agalmatolito.....	79
6.9 Principais especificações para refratários sílico-aluminosos.....	81
6.10 Principais especificações para cargas minerais.....	82
6.11 Resumo dos resultados dos ensaios tecnológicos.....	83
6.12 Avaliações dos recursos geológicos.....	84
7 CONCLUSÕES.....	86
8 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
8.1 Trabalhos geológicos.....	88
8.2 Ensaios tecnológicos.....	88
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICES E ANEXO.....	93

## 1 INTRODUÇÃO

A geologia e as ocorrências dos depósitos de agalmatolito da região central de Minas Gerais vêm sendo estudadas ao longo do tempo por diversos autores, porém esses trabalhos se resumem em algumas observações geológicas e mineralógicas, pontuais e dispersas, seja a partir de relatórios técnicos de pesquisa mineral de circulação restrita de empresas mineradoras ou trabalhos de reconhecimento geológicos em diversas escalas, publicados em eventos. A partir de 2006, a região passou a contar com um trabalho de mapeamento geológico sistemático, a Folha Pará de Minas (Romano 2006), o que constitui ótima referência bibliográfica para a região.

Os depósitos de agalmatolito são conhecidos desde a década de 1930, principalmente na região de Mateus Leme - Pará de Minas, onde sempre foram utilizados como minerais industriais não-refratários. A partir de 1960, na região de Onça de Pitangui e Pitangui, verificou-se mais interesse na sua exploração pela Magnesita Refratários S.A., que desenvolveu diversos tipos de agalmatolitos como excelentes matérias-primas na fabricação de refratários sílico-aluminosos, indispensáveis para o revestimento de altos-fornos das grandes empresas siderúrgicas brasileiras.

Até 1980, a produção mensal média total da Magnesita Refratários S.A. referente aos diversos tipos de agalmatolito era da ordem de 5.000 toneladas, porém esta produção veio decrescendo e atualmente encontra-se na faixa de 300 toneladas mensais. Essa drástica redução ocorreu devido à utilização de matérias-primas minerais alternativas de mais refratariedades e custos mais baixos, tais como as argilas de alto-alumínio, substituições necessárias para o desenvolvimento tecnológico do setor da cerâmica de refratários visando à obtenção de mais vida e melhor desempenho de seus produtos.

O setor siderúrgico é responsável por 70% do consumo de refratários no Brasil, porém o uso de refratários estende-se também às áreas dos recursos não-metálicos. Todos os fornos e outros equipamentos pirometalúrgicos exigem o emprego de materiais inertes e resistentes ao calor. Os principais exemplos dessa área são as indústrias de cimento e cal.

A Magnesita Refratários S.A., tradicional empresa mineradora, detentora de reservas significativas de agalmatolito na região de Onça de Pitangui e Pitangui-MG, atualmente tem os seus trabalhos de extração concentrados apenas na Serra dos Ferreiras, Onça de Pitangui, onde a produção é feita por meio de lavra a céu aberto. Devido à grande relação estéril/minério, os custos de produção têm se elevado significativamente e a empresa tem especial interesse em viabilizar o uso industrial dos diversos tipos de agalmatolito, hoje considerados estéreis.

O mercado nacional de agalmatolito para uso em aplicações industriais não-refratárias, segundo Lobato (2005), foi estimado em 2005 em 75.000 t/ano. Esse mercado vem sendo suprido pelas empresas mineradoras da região de Pará de Minas e Mateus Leme. Cerca de 80% da produção são destinados à indústria de tintas, onde o agalmatolito vem substituindo o talco como mineral funcional; 10% do volume total são destinados para a indústria de cerâmica; e os outros 10% se distribuem entre as indústrias de borracha, defensivos agrícolas e outros. Com o preço médio estimado em R\$ 310,00/ *free carrier*<sup>2</sup> (FCA) – MG, estima-se um mercado em torno de R\$ 20.000.000,00/ano.

No presente trabalho, foi realizado um estudo geológico do depósito de agalmatolito da Serra dos Ferreiras, com a caracterização dos diversos tipos passíveis de aplicação industrial e seus respectivos volumes, procurando estabelecer comparações mineralógicas e tecnológicas com os agalmatolitos da região de Pará de Minas - Mateus Leme, com ênfase em evidenciar suas aptidões industriais.

O primeiro capítulo traz uma breve introdução sobre o agalmatolito da região, sua localização geográfica e aspectos fisiográficos regionais. No capítulo 2 estão expressos os objetivos desta dissertação. O capítulo 3 apresenta revisão bibliográfica sobre os principais conceitos relacionados aos minerais e rochas industriais, definições de agalmatolito, aspectos geológicos dos depósitos em diversas partes do mundo, bem como dados de produção e aplicações industriais. Dados da geologia regional estão contidos no capítulo 4. Os trabalhos realizados no campo bem como no laboratório estão descritos no capítulo 5.

Os capítulos 6, 7 e 8 abordam, respectivamente, as discussões dos resultados, as

---

<sup>2</sup> O vendedor completa suas obrigações quando entrega a mercadoria desembaraçada aos cuidados do transportador no local determinado.

conclusões obtidas e as sugestões propostas para trabalhos futuros. No nono e último capítulo estão listadas as referências bibliográficas utilizadas na realização deste trabalho.

### 1.1 Localização da área de estudo

A área do presente estudo está delimitada por um polígono irregular de 120 hectares e situa-se no local denominado Serra dos Ferreiras I, no município de Onça de Pitangui, Minas Gerais (FIG. 1). Trata-se de uma área com titularidade da Magnesita Refratários S.A., registrada no Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) desde o ano de 1960. Sua delimitação foi feita pelas coordenadas listadas no QUADRO 1.

QUADRO 1  
Distâncias e rumos dos limites da área

Distância (m)	Rumo	Ângulo
1260	NW	37° 15' 00"
275	SW	52° 45' 00"
1080	SW	20° 45' 00"
1460	SE	75° 15' 00"
547	NW	05° 00' 00"

O acesso à área, a partir de Belo horizonte, é feito tomando-se a BR-381 até a cidade de Betim; em seguida, percorrem-se cerca de 10 km, chegando ao entroncamento que dá acesso ao Triângulo Mineiro. Daí segue-se até a cidade de Pará de Minas, aproximadamente 70 km. De Pará de Minas são mais 3,5 km por meio da BR-352 até o trevo do povoado de Capoeira Grande. A partir de Capoeira Grande, segue-se na direção norte, por uma estrada sem pavimentação, com boas condições de tráfego por aproximadamente 6 km, atingindo-se a porção sul da área de estudo.



FIGURA 1 - Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: modificada do DNIT (2004).

## 1.2 Aspectos fisiográficos

A geomorfologia da região, segundo o conceito de King (1957), consiste em topos aplainados evidenciados pelas serras quartzíticas mais elevadas, onde se nota o desenvolvimento, por vezes extenso, de carapaças lateríticas consolidadas que devem representar as superfícies mais antigas da plataforma sul-americana. A superfície de aplainamento foi quase que inteiramente retrabalhada pelo Ciclo Velhas, restando como única testemunha o *Plateau* de Pitangui, ao norte da Serra dos Ferreiras.

O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação Köppen, ou seja, tropical de altitude, mesotérmico de verão chuvoso e quente, com temperatura média anual variando de 16,5°C no mês de julho a 23°C no mês de dezembro. A evaporação não oscila muito ao longo do ano, sendo abril o mês de mais baixo valor (60 mm) e agosto o mês de maior evaporação (110 mm). A umidade relativa do ar também varia pouco durante o ano, com média anual em torno de 70%.

A vegetação predominante é do tipo cerrado de porte médio e floresta perenifólia a subcaducifólias, podendo ser encontradas matas ciliares nas nascentes e em cursos de rios.

A outra parte da vegetação está representada por pastagens e por vegetação secundária, ou seja, remanescente, em fases diversas de crescimento.

A área em estudo situa-se na bacia hidrográfica do rio São Francisco, sub-bacias dos rios Pará e Paraopeba, ambas afluentes em sua margem direita. Os cursos d'água tributários mais importantes do rio Pará são o rio São João e o rio do Peixe, ao norte de Pitangui.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Apresentar dados e observações da geologia, propriedades mineralógicas e geoquímicas e caracterizações tecnológicas preliminares de laboratório dos principais litotipos de agalmatolito da Serra dos Ferreiras, Onça de Pitangui-MG.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Elaborar mapeamento geológico do depósito de agalmatolito e entorno, escala 1: 10.000.
- Elaborar mapeamento geológico em escala 1: 1.000.
- Realizar trabalhos de pesquisa mineral, para reavaliação do depósito.
- Proceder a levantamento bibliográfico dos ensaios de caracterização e beneficiamento realizados pela Magnesita Refratários S.A., nos últimos anos.
- Levantar informações que possam contribuir para o conhecimento do depósito estudado e seus aspectos texturais, mineralógicos e físicos dos tipos de agalmatolito e sua comparação com os dos depósitos da região de Pará de Minas e Matheus Leme.
- Realizar ensaios tecnológicos preliminares que possam subsidiar o desenvolvimento de produtos não-refratários para aplicações diversas na indústria.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Definições de minerais e rochas industriais (MRI)

Os minerais e rochas industriais (MRI) constituem um grupo de substâncias minerais que, pela sua amplitude, pode-se considerar que a sua principal característica é a diversidade de propriedades e de aplicações, de seu valor unitário e da quantidade produzida e de sua gênese e forma de ocorrência geológica.

Uma das características que definem os MRIs é sua versatilidade, isto é, sua capacidade para ser aplicado em distintos usos e em diferentes tipos de indústrias. Não existem indústrias nem tarefas do cotidiano doméstico que não usem MRI em maior ou menor extensão. Os principais setores consumidores são da construção civil, químico, agrícola e siderometalúrgico. A estes se podem acrescentar, ainda, o farmacêutico, ou de manufatura, o elétrico, o eletrônico e outros.

Atualmente, diversos autores sugerem a conveniência de se usar a produção de MRI como uma medida aceitável do amadurecimento industrial de um país. Quanto mais tarde se verifique o momento em que a produção nacional de minerais e rochas industriais supere em valor a produção de minerais metálicos, mais recente é a industrialização desse país (Bristow 1987). Em países de longa tradição industrial, como o Reino Unido, faz muito tempo que a produção de MRI superou amplamente a produção de minerais metálicos. Isto aconteceu nos Estados Unidos da América (EUA) no início do século XX, na Espanha no começo dos anos 1970 e na Austrália no final dos anos 1980 segundo Hill (1993, *in* Lobato 2007). Na Tailândia, por exemplo, país que tem experimentado rápida industrialização nas últimas décadas, a produção de minerais e rochas industriais alcançou a de metálicos entre 1990 e 1991 (Togashi 1992).

Os MRIs serão, segundo Kuzvart (1984, *in* Perez, 2001), “as matérias-primas típicas da segunda Revolução Industrial, as matérias-primas do terceiro milênio”. Esta afirmação, que pode parecer exagerada, tem sentido, considerando-se que os MRIs são imprescindíveis na obtenção de diversos produtos de alta demanda pela sociedade pós-

industrial: plásticos, fibra óptica, colas adesivas, isolantes, produtos químicos e farmacêuticos, fertilizantes, abrasivos, lubrificantes, componentes eletrônicos, materiais de alta pureza, etc. E tudo isso sem mencionar os significativos volumes de matérias-primas que demanda a construção civil e que, devido ao aumento de população e ao desenvolvimento do nível de vida previsíveis, haverão de multiplicar-se nas próximas décadas.

Assim, resta no grupo dos minerais e rochas industriais uma grande variedade de minerais, com determinadas propriedades físicas e químicas que os tornam insumos em processos industriais como matérias-primas e/ou auxiliares no processo. As matérias-primas minerais são as substâncias incorporadas ao produto no processo de fabricação, como a argila à peça cerâmica, o caulim ao papel e o carbonato de cálcio ao plástico. Os auxiliares de processo participam do processo de fabricação, mas não se incorporam ao produto final, como diatomito em filtração de bebidas e areia no molde de fundição.

Não existe uma classificação rígida para os MRIs, pois muitos se enquadram perfeitamente em duas ou mais subclasses, quaisquer que sejam as classificações adotadas. Geralmente, sua definição e classificação são marcadas mais pela exclusão das outras classes de substâncias minerais do que pelas suas próprias características, a exemplo da definição de minerais e rochas industriais no clássico *Glossary of Geology* (Bates & Jackson 1987): “qualquer rocha, mineral ou outra ocorrência mineral natural de valor econômico, excluindo os minérios metálicos, combustíveis e gemas. [...]”

O Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), órgão do Ministério de Minas e Energia, responsável pela gestão e estatísticas do setor mineral, classifica as substâncias minerais em minerais metálicos, minerais não-metálicos, gemas e diamantes e energéticos. Os minerais e rochas industriais englobam os minerais não-metálicos e, adicionalmente, podem agrupar também alguns minerais típicos de outras classes. É o caso de algumas substâncias metálicas quando a sua função não é formar liga metálica (por exemplo, a cromita quando incorporada em ligas ferro-cromo é um mineral metálico típico, mas trata-se de um mineral industrial quando incorporado em refratários). No caso de energéticos, usos não-combustíveis, como de turfa para absorção de óleos e de carvão ativado para filtros, caracterizam-se como MRI.

Hill (1993, *in* Lobato 2007) sugere que o termo “minerais e rochas industriais” inclui todas as rochas e minerais, inclusive os sintéticos, predominantemente não-metálicos que, por suas propriedades físicas ou químicas, e não pela energia gerada ou pelos metais extraídos, podem ser utilizados em processos industriais, de modo geral com múltiplas funções, como matéria-prima, componente especial da formulação ou aditivo, diretamente como extraído ou após beneficiamento e processamento.

A FIG. 2 ilustra o grau de complexidade e de diversidade que caracteriza os estudos e negócios com os MRIs.

### DIVERSIDADE DOS MINERAIS E DAS ROCHAS INDUSTRIAIS



FIGURA 2 - Grau de complexidade e de diversidade que caracteriza os estudos e os negócios com os minerais e rochas industriais.

Fonte: Ciminelli (2001).

O volume e valor unitário variam significativamente entre os segmentos industriais para um mesmo mineral industrial. Um único mineral pode desempenhar inúmeras funções industriais, mesmo em uma mesma indústria. Assim, vários tipos de produtos minerais com especificações diferentes podem ser produzidos da mesma fonte mineral para atingir desempenhos e funções específicos. As exigências e especificações de cada mercado para determinado mineral devem ser conhecidas em todas as fases desde a pesquisa geológica. Portanto, recomenda-se prudência na valorização excessiva da análise química como parâmetro de caracterização e avaliação de um depósito/minério, em detrimento de testes

físicos e tecnológicos que podem ser mais importantes e, eventualmente, até mais baratos, rápidos e decisivos (Ciminelli 2001).

É importante destacar que a pesquisa mineral e o aproveitamento dos MRIs diferem dos minerais metálicos. Na pesquisa dos metálicos, em geral mais caros e escassos na natureza, os fatores geológicos são mais críticos, sendo comum que as possibilidades de aproveitamento sejam equacionadas em termos de reservas e teores limites. Para os MRIs, mais baratos e abundantes, devem ser aprofundados os estudos tecnológicos/econômicos, que são decisivos para o início e continuidade das pesquisas. Em geral, a investigação dos MRIs é iniciada por provocação de mercado, enquanto a dos minerais metálicos é iniciada por uma perspectiva geológica. No QUADRO 2 são apresentadas as principais aplicações dos minerais e rochas industriais.

## QUADRO 2

### Minerais e rochas industriais *versus* aplicações

	Construção	Cerâmica	Cimento e Cal	Vidros	Refratários	Indústria Química	Agricultura	Cargas (Filler)	Pelletização	Moldes de Fundição	Fundentes Metalúrgicos	Jóias / Decoração	Abrasivos	Pigmentos	Clarificantes	Filtrantes	Ótica e Eletrônica	Lamas de Perfuração
1 - Amianto	⊕				○			⊕										
2 - Areias Silicosas	●	⊕	○	●	⊕	⊕		○		●	⊕		⊕			●	⊕	○
3 - Argilas: Comum	●	●	●															
Caulim		●	○	○	⊕			●										
Bentonita	○	○						○	●	●					●			●
4 - Barita		○		○		●		○				○		○				●
5 - Bauxita, Cianita e correlatos		○	○	○	●	⊕		○		○		○		○				
6 - Calcário, Dolomito e Cal	●	○	●	●	●	●	●	●	●		●	○	○		○		○	○
7 - Diamante												●	●				○	
8 - Feldspato e Nefelina Sienita		●		●				⊕				○	○					
9 - Fluorita		○		○		●					●	○					○	
10 - Fosfato				○		⊕	●											
11 - Grafita					⊕			○		○								
12 - Ilmenita, Rutilo e Zirconita		○			○	⊕				○				●				
13 - Magnesita					●	○	○					○						
14 - Rochas Ornamentais	●											⊕						
15 - Talco e Pirofilita		⊕			○			●				○	○					

Legenda: ● USO IMPORTANTE ⊕ USO ADICIONAL ○ USO OCASIONAL

Fonte: Moreira (1994).

### 3.2 Definições de agalmatolito

Na legislação mineral brasileira, para o aproveitamento econômico desse tipo de bem mineral, os termos existentes são agalmatolito e pirofilita<sup>3</sup>. Portanto, no presente trabalho, o termo “agalmatolito” é utilizado de maneira geral, principalmente em substituição ao termo pirofilita, quando se referir à rocha e não ao mineral. Nas citações bibliográficas procurou-se, sempre que possível, respeitar a terminologia original.

O termo agalmatolito, usado no Brasil, abrange as rochas com composição mineralógica variável em pirofilita, muscovita, diásporo, cianita, quartzo, etc. No Japão, rochas similares são denominadas de *roseki*; na África do Sul, de *wonderstone*; no Canadá e Estados Unidos, apenas de pirofilita (Harben 1995).

Romano (1990) define o agalmatolito como produto de alteração hidrotermal de rochas vulcânicas ácidas e intermediárias sob condições pré-metamórficas mesotermiais e o descreve como rochas que possuem teores variados de coríndon, muscovita e polimorfos  $Al_2SiO_5$  (principalmente andaluzita e cianita) como mineralogia primária; e diásporo, pirofilita e caulinita como mineralogia retrometamórfica.

Nogueira & Barzaghi (1972) demonstraram a existência de diferentes tipos de agalmatolitos na região de Pará de Minas, com grandes variações de composição química e mineralógica, em cuja composição a pirofilita pode estar ausente ou constituir o componente principal (60% do material). Pirofilita, diásporo e cianita caracterizam os tipos mais refratários e muscovita os tipos de menor ponto de fusão dos agalmatolitos.

Rochas compostas principalmente de pirofilita, muscovita (variedade sericita) e/ou caulinita com alguns outros minerais tais como quartzo e pirita são denominadas de *roseki* no Japão (Nabetani & Shikazono 2002).

Nas publicações oficiais nacionais e internacionais, é usado o termo comercial “pirofilita”, porém este é o nome do mineral, normalmente o principal mineral da rocha. Raramente esse mineral ocorre totalmente puro em depósitos econômicos, porém, ele pode estar

---

<sup>3</sup> (<http://www.dnpm.gov/>)

ausente e o que predomina é a muscovita, por exemplo, muscovita-xisto (agalmatolito tipo canjica, no jargão mineiro) na Serra dos Ferreiras.

O mineral pirofilita é um filossilicato hidratado de alumínio, apresentando aproximadamente 28% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 67% de  $\text{SiO}_2$  e 5% de  $\text{H}_2\text{O}$ , com propriedades cristalográficas e físicas similares às do talco.

A pirofilita e o talco são os minerais mais simples do grupo de filossilicatos do tipo 2:1, pois mostram uma camada de octaedro entre duas camadas de tetraedros (FIG. 3). As estruturas desses minerais podem ser construídas a partir da união de uma camada de tetraedros com uma de octaedros, do tipo pirofilita ou talco. Essas camadas formarão folhas eletricamente neutras, unidas através de ligações de van der Waals.

A pirofilita é macia, sedosa, escorregadia e esbranquiçada e é análoga ao talco, com o qual tem muitas diferenças e similaridades. Entretanto, as características dos outros minerais associados podem influenciar nas propriedades comerciais dos agalmatolitos. Por exemplo, o quartzo contribui com a abrasividade; a cianita e o diásporo com a refratariedade; e a muscovita age como fundente. Além disso, a pirofilita é encontrada em várias formas:

- Granulação fina com foliação lamelar exibindo planos de clivagem (*fillers*);
- maciços com agregados esféricos de pequenos cristais (refratários);
- cristais aciculares radiados (*fillers*) (Harben 2002).

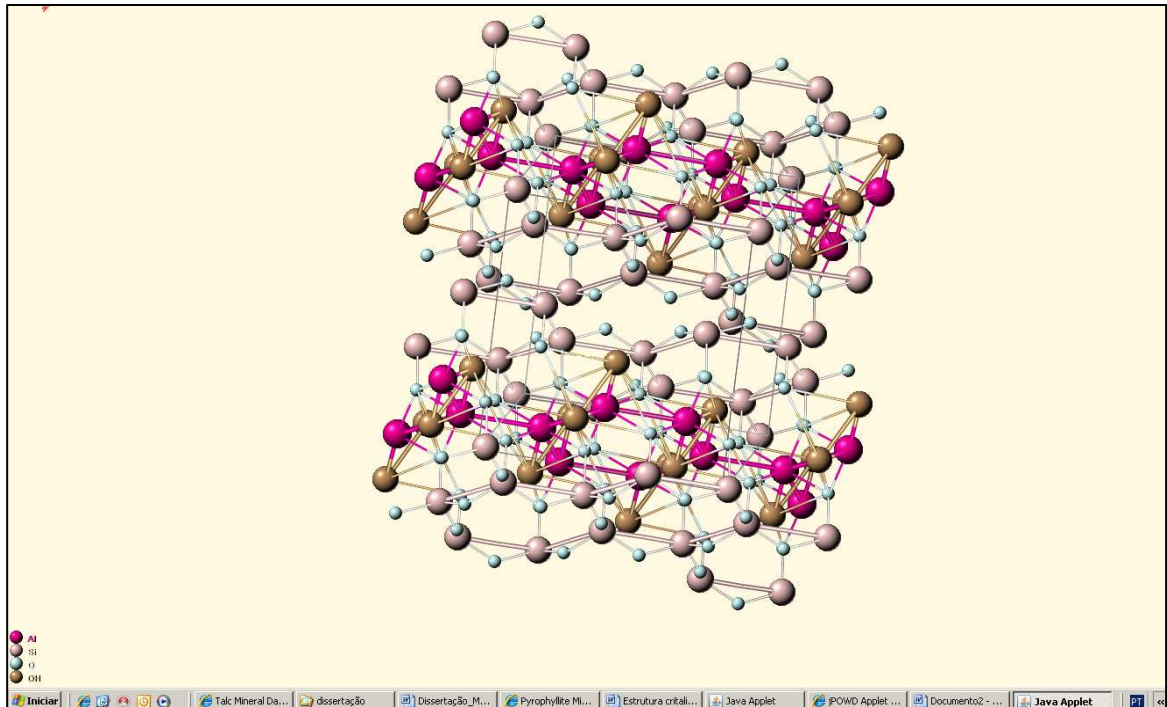


FIGURA 3 - Estrutura cristalina da pirofilita.

Fonte: ([www.webmineral.com/data/Pyrophyllite](http://www.webmineral.com/data/Pyrophyllite)).

### 3.3 Aspectos geológicos dos depósitos de agalmatolitos

As ocorrências de pirofilita (agalmatolito), em nível mundial, são geralmente divididas em dois grupos (Cornish 1998).

- Rochas vulcânicas ácidas com baixos teores de álcalis e ferro, alteradas hidrotermalmente ao longo de zonas de falhas. O melhor exemplo deste grupo são as pirofilitas derivadas de pórfiros e riolitos no Japão, as derivadas de quartzopórfiro e andesitos na Coreia do Sul, as derivadas de riolitos vulcânicos na Carolina do Norte nos USA e as originadas de riolitos piroclásticos na Austrália;
- pirofilitas podiformes originárias do metamorfismo dos tufos e cinzas vulcânicas associadas a xistos, como as que ocorrem no Brasil; ressalte-se que essa interpretação não tem respaldo, em vista dos trabalhos mais recentes.

Fujii (1983), estudando os agalmatolitos japoneses, afirma que o mineral pirofilita é formado em relativa baixa profundidade, pela alteração hidrotermal ácida. Entretanto, o modo de ocorrência dos outros constituintes minerais, o tamanho e forma dos depósitos são

notavelmente diferentes. Essas diferenças são baseadas principalmente na variação das rochas regionais, estruturas geológicas e propriedades físico-químicas relativas à solução hidrotermal.

Em geral, os depósitos de agalmatolitos do Japão são geneticamente divididos em dois tipos:

- Formado por alteração hidrotermal de rochas intrusivas ácidas e intermediárias e também de rochas vulcânicas tais como pórfiros e riolitos. Os depósitos são de formas variadas: maciços, estratos ou veios pequenos e contêm tipos variados de minerais, inclusive caulinita, muscovita (sericita), coríndon, andaluzita e outros;
- formado por alteração hidrotermal exalativa próximo da superfície e compreende uma zona central com rochas silicosas, zona marginal facilmente sericitizada e uma zona intermediária com pirofilita.

Em seu artigo sobre a geologia e origem da pirofilita nos depósitos de Puturge Massif, na Turquia, Uygun & Solakoglu (2002) afirmam que a coexistência da cianita e pirofilita indica a origem metamórfica da pirofilita. A existência de duas fases metamórficas sucessivas nesses depósitos, sendo uma na fácies anfíbolito e a outra um retrometamorfismo na fácies xisto verde, evidenciou que a cianita foi desenvolvida de tufos com alto teor de alumínio e/ou caulinita em granitos ou outras rochas vulcânicas equivalentes no estágio progressivo e substituída por pirofilita em estágio retrógrado.

Bucher & Frey (1994, *in* Uygun & Solakoglu, 2002) reportam que a caulinita na temperatura acima de 300°C e cianita + quartzo na temperatura de 400°C e pressão inferior a 4 Kbar reagem para formar pirofilita. Associações de quartzo com pirofilita ou com cianita e até mesmo a presença de rochas ricas em sílica junto com pirofilita implicam que as transformações nesse estágio foram abaixo de 400°C.

O mineral pirofilita pode formar-se pela alteração hidrotermal de tufos vulcânicos, pórfiros e brechas em relativa baixa profundidade. A alteração é controlada por fissuras, estratos, falhas e estruturas da rocha original e natureza dos fluidos hidrotermais (Carolina do Norte, Estados Unidos, Pambula, Austrália, Okayama, Japão). Corpos com mineral pirofilita muitas vezes fazem parte da sequência da zona de alteração, desde veios, depósitos

estratificados e até massas irregulares de até 500 m de largura por 2.000 m de extensão e 500 m de profundidade (Carolina do Norte, Estados Unidos) (Harben 2002).

### 3.4 Produção mundial de pirofilita (agalmatolito)

De acordo com Harben (2002), a produção mundial de pirofilita em 2000 foi de 2,35 milhões de toneladas, excluindo-se a produção chinesa, sendo que 80% da produção são do Japão e Coreia do Sul. Produções mais modestas são do Brasil, Índia, Estados Unidos, China, Paquistão, Tailândia e Turquia (GRÁF. 1). A produção anual brasileira consta de 452.000 toneladas (talco, pedra-sabão e pirofilita). Conforme Ciminelli (2001), a produção brasileira de agalmatolito em 2000 foi de apenas 113.000 toneladas.

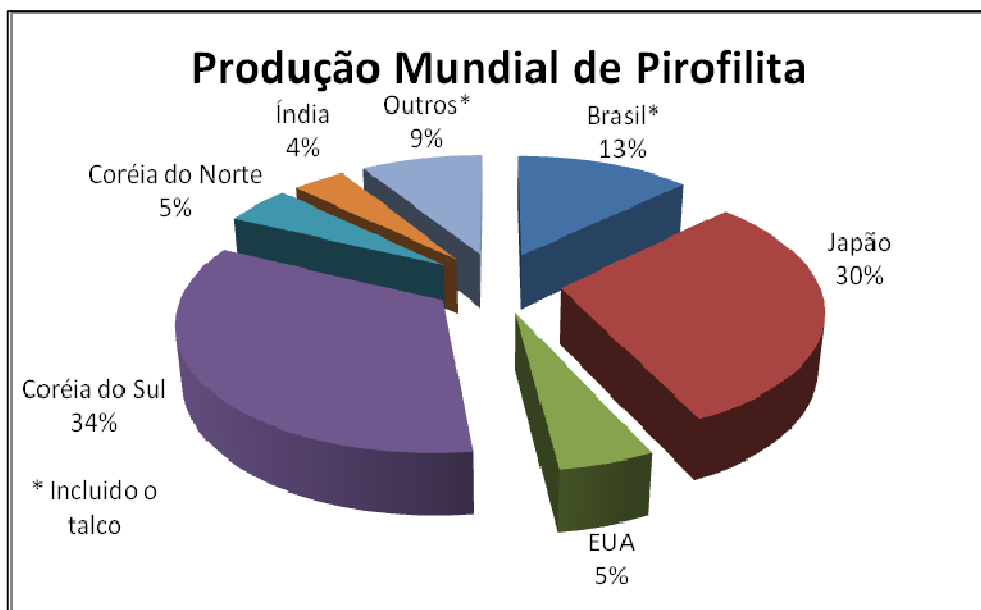


GRÁFICO 1 - Distribuição da produção mundial de pirofilita em 2000.

Fonte: Harben (2002).

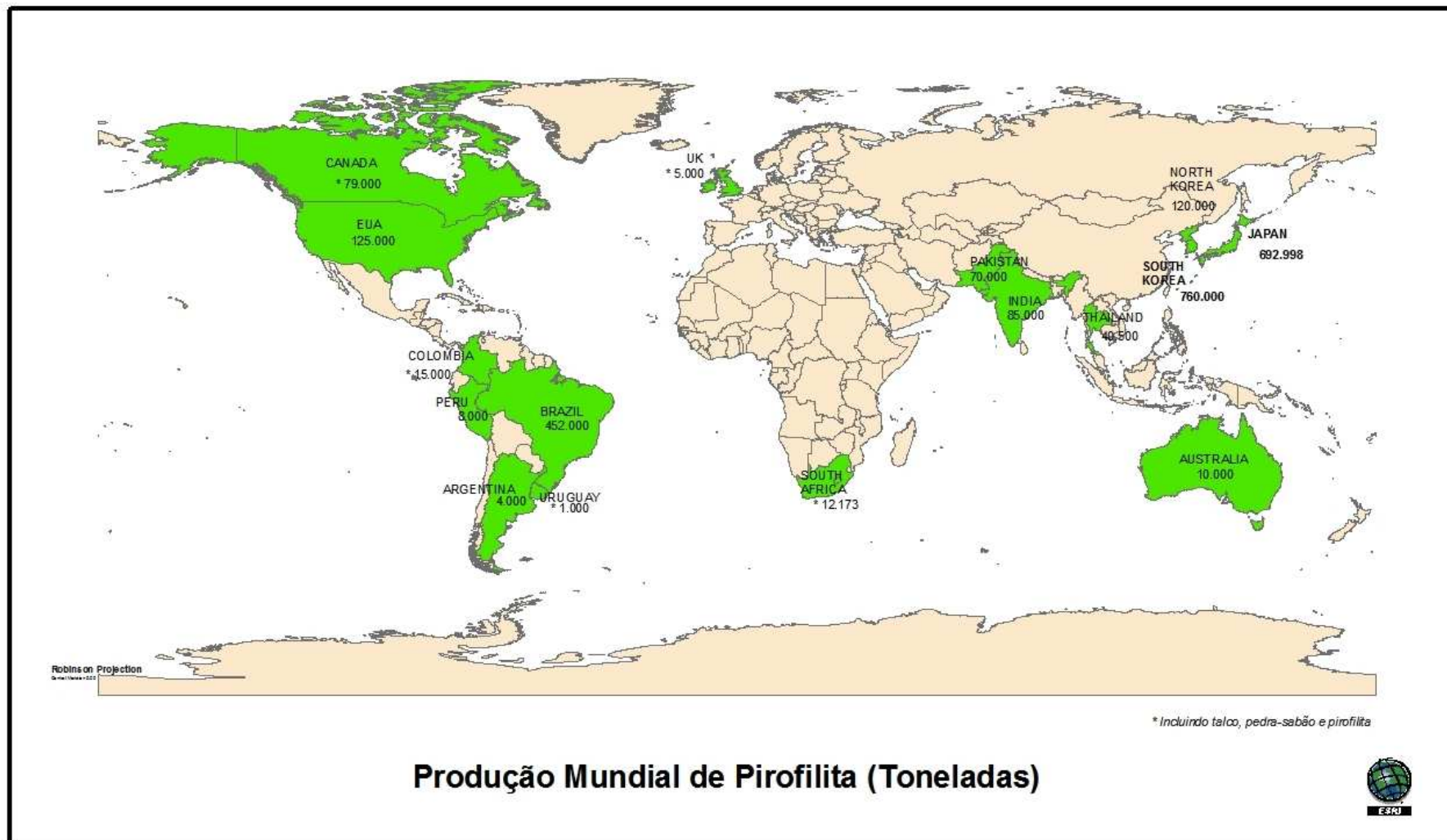


FIGURA 4 - Produção mundial de pirofilita em 2000.

Fonte: Harben (2002).

### 3.5 Aplicações industriais

O talco e o agalmatolito têm propriedades e usos similares. A textura lamelar e o aspecto sedoso ao tato confundem essas rochas e, por isso, algumas vezes têm sido distribuídas no mercado nacional com denominações errôneas, como talco esteatítico e talco caulínico. Há uma tendência tanto nacional como mundial a não separar os seus dados estatísticos, dificultando o levantamento de informações sobre a produção, cotação e reservas geológicas dos agalmatolitos.

Os agalmatolitos possuem atributos químicos, físicos e mineralógicos que os tornam excelente material industrial. A maior parte da produção obtida a partir dele destina-se às indústrias de produtos minerais não-metálicos.

A produção de agalmatolitos, no Brasil, provém toda do estado de Minas Gerais, concentrada nos municípios de Mateus Leme, Pará de Minas, Pitangui e Onça de Pitangui (Luz *et al.* 2001). Os principais setores industriais estão descritos a seguir.

#### 3.5.1 Refratários sílico-aluminosos

Os agalmatolitos possuem refratariedade ou cone pirométrico equivalente (CPE), variando de 26 a 33, isto é, fundem-se entre 1.621°C e 1.743°C e se decompõem a 1.200°C, principalmente em cristobalita e mulita, com correspondente aumento na dureza de 1-2 para 7-8 na escala de Mohs. As características mais importantes são: baixo coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica elevada, boa resistência à corrosão pelos metais fundidos e escórias básicas (Harben 2002).

Os principais agalmatolitos usados em refratários são aqueles com mais altos teores de alumínio e baixos teores de álcalis, isto é, em sua composição mineralógica devem predominar a pirofilita, o diásporo e/ou a cianita.

Os agalmatolitos que por análises químicas em base calcinada apresentem teores de até 45,99% em  $Al_2O_3$  são classificados, conforme o QUADRO 3, como materiais refratários sílico-aluminosos.

## QUADRO 3

Classificação de materiais refratários sílico-aluminosos com base em análises químicas  
(ABNT, NBR 10.239/1996)

Classes	SA-4	SA-3	SA-2	SA-1
<b>Características</b>				
% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,00 a 27,99	28,00 a 33,99	34,00 a 39,99	40,00 a 45,99
CPE igual ou superior a	C.P.E 26 (1.621°C)	C.P.E 29 (1.659°C)	C.P.E 31 (1.699°C)	C.P.E 33 (1.743°C)

CPE = cone pirométrico equivalente.

### 3.5.2 Tintas

Os agalmatolitos são utilizados na fabricação de tintas látex e a óleo. O setor restringe a aplicação em relação à cor, granulometria, densidade absoluta, absorção a óleo, teor de umidade e pH (Lara Filho 1997). Suas principais vantagens ou requisitos são:

- Lamelaridade;
- alta brancura;
- adequada absorção de óleo;
- melhoramento da dureza do filme;
- controle do brilho e da opacidade;
- excelente estabilidade devido à sua estrutura lamelar, evitando-se sedimentação;
- melhor durabilidade e lavabilidade que tintas com CaCO<sub>3</sub>, evitando-se o surgimento de rachaduras e descascamento;
- melhora de estabilidade e emulsões;
- compatível com resinas alquídicas e acrílicas, poliuretano, poliéster, epóxi e outras;
- prevenção contra escorrimientos;
- melhoramento da resistência à abrasão, em tintas de sinalização;
- boa dispersão;
- melhoramento do lixamento em *primers*.

Castro & Petter (2004) mostraram sua aplicabilidade também como extensor de TiO<sub>2</sub> e carbonato de cálcio precipitados em tintas imobiliárias.

### 3.5.3 Plásticos

Na indústria de plásticos, principalmente fios e cabos de polímero termoplástico (PVC), os agalmatolitos auxiliam nas propriedades de resistividade elétrica e mecânica. Colaboram com sua alvura na formulação de plásticos brancos e coloridos. Podem ser utilizados como extensor do dióxido de titânio em proporções variáveis, atingindo até 35% (Luz *et al.* 2001). As principais vantagens de seu uso são:

- Diminuição de custos em plásticos de engenharia de alto valor agregado, como: resinas cristalizadas, polissulfonas, poliamidas, etc.;
- melhoramento de propriedades mecânicas de polipropileno de alta densidade e em outros plásticos de uso comum;
- melhoramento da estabilidade dimensional;
- propriedades térmicas;
- auxílio na cristalização, especialmente em poliamidas (*nylon*) e PET (plástico);
- mais dureza;
- menor contração;
- alta pureza;
- boa dispersão;
- inodoros e atóxicos, o que possibilita o contato com alimentos;
- opacificantes em filmes plásticos.

### 3.5.4 Cerâmica

Ricos em fundentes (altos teores de sódio e potássio), sílica e alumina, os agalmatolitos são uma matéria-prima importante para a formulação de porcelanato, porcelana, engobes, fritas e vidrados. Substituem, em parte, o uso tradicional de feldspato/sílica como fonte de alumina e sílica. Os baixos teores de óxidos cromóforos conferem excelente cor de queima aos agalmatolitos (Perez *et al.* 1999).

### 3.5.5 Celulose e papel

Com a função de adsorver o *pitch* coloidal (resina do processo de fabricação da celulose), os agalmatolitos evitam, desta forma, a geração de incrustações prejudiciais ao processo e também que esse contaminante prejudique as propriedades do papel, principalmente a alvura. Nessa aplicação, enfrentam a concorrência do talco nacional e do importado.

Os agalmatolitos também são usados como carga (*filler*). As principais propriedades que definem o uso dos minerais industriais no fabrico do papel são: composição e propriedades químicas, geometria das partículas, densidade, abrasividade e alvura (Harben 2002).

### 3.5.6 Borrachas e elastômeros

Na indústria de borrachas, podem ser utilizados em conjunto com o negro de fumo ou sílicas precipitadas como agente de carga ou semirreforçante, dependendo da granulometria. Os agalmatolitos incorporam-se como carga inerte nas massas de borracha a serem vulcanizadas. A morfologia dos seus minerais auxilia no fluxo do material e age como semirreforçante. Outras vantagens são:

- Uso tanto em formulações de borracha natural como de elastômeros;
- aumento da durabilidade;
- controle da dureza;
- melhoramento de algumas propriedades mecânicas, funcionando como agente de reforço;
- efeito desmoldante.

### 3.5.7 Sabões, detergentes e outros produtos químicos

Na fabricação de sabões e sabonetes, os agalmatolitos são utilizados como carga após a saponificação e formação da base. As principais vantagens são:

- Inércia química, o que não causa alergias e irritações;
- alta pureza química;

- inodoro;
- redução de custos, funcionando como elementos de preenchimento;
- atuação como ligante em sabões;
- retenção de umidade;
- auxílio na limpeza, sem aderir a fibras têxteis.

### 3.5.8 Cosméticos

A indústria de cosméticos exige cargas minerais de alta qualidade e pureza. As principais exigências se prendem à cor, pH, teor de ferro solúvel em água, solúveis em ácido e/ou água, não-existência de substâncias abrasivas, restrições à presença de arsênio e chumbo e contaminações bacteriológicas (Lara Filho 1997). As principais vantagens dos agalmatolitos são:

- Inércia;
- alta pureza química;
- inodoro;
- carregador de perfume, devido à sua estrutura lamelar;
- ligante em sabonetes e auxílio na dureza final.

### 3.5.9 Outros usos

Os agalmatolitos também são usados em obras de artes plásticas e na decoração de paredes de edifícios, principalmente em mosaicos. Os mosaicos que revestem a estátua do Cristo Redentor, na cidade do Rio de Janeiro, são constituídos, em parte, por agalmatolitos de Pará de Minas-MG e, em parte, pelo esteatito de Herculano Pena (Moraes 1938).

Na fabricação de cimento branco, os agalmatolitos têm que ter baixos teores de ferro e cromo e tonalidade esbranquiçada. As especificações químicas da Camargo Correa Cimentos S.A. para os agalmatolitos da Serra dos Ferreiras II são:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,15\%$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 0,1\%$  e  $\text{MnO}_3 \leq 0,1\%$ .

Os depósitos de agalmatolito da Turquia têm sido usados nos últimos anos essencialmente na produção de cimento branco, devido aos baixos teores de ferro e cromo (Uygun & Solakoglu 2002).

### **3.5.10 Minerais industriais alternativos**

Os principais minerais alternativos ou substitutos dos agalmatolitos, dependendo da finalidade de uso, podem ser citados:

- Refratários sílico-aluminosos: os agalmatolitos direcionados para esse uso vêm apresentando tendência à queda de consumo, principalmente os de alto teor em álcalis ( $K_2O + Na_2O$ ), que são substituídos por outros minerais sílico-aluminosos tais como caulins, argilas e cianita. Porém, em muitos produtos os agalmatolitos ainda não têm substitutos;
- tintas: talco, carbonato de cálcio (precipitado ou natural), caulins e dióxido de titânio em formulações diversas de tintas;
- cerâmica: talco e feldspato;
- celulose e papel: talco;
- cosméticos: talco;
- borracha: caulim e talco.

### **3.6 Método de lavra**

No depósito em estudo, o método de lavra empregado é o a céu aberto, com bancos de 5 metros e banco final de 10 metros. O ângulo na face de cada banco é de 90°, a berma de 10 metros e o talude de cava final de 50°. O desenvolvimento para retirada do estéril é feito por carregadeira frontal ou escavadeira hidráulica. Após a retirada do material de capeamento, os agalmatolitos de interesse são desmontados com explosivo, por empresa especializada terceirizada. As matações são quebradas abaixo de 30 cm, com rompedores hidráulicos manuais.



FIGURA 5 - Foto da Frente de Lavra Lamelar,  
da Serra dos Ferreiras.

A extração e seleção dos diversos tipos de agalmatolito são manuais, para garantir a qualidade dos diferentes materiais. Eles são colocados em caçambas separadas e transportados por caminhões basculantes de 10 toneladas para os pátios de matérias-primas, onde ocorre a estocagem em pilhas separadas. Os lotes são amostrados e, de acordo com os resultados de suas características químicas e físicas, são liberados. Quando não atingem as especificações, esses lotes são novamente selecionados e/ou blendados com outros<sup>4</sup>. Após a liberação, são enviados para a fábrica e, dependendo do seu uso, podem ser antes britados e moídos em empresas terceirizadas (FIG. 6).

---

<sup>4</sup> Essa metodologia, apesar de ser artesanal, é usada pelos principais mineradores de minerais e rochas industriais, em que o único beneficiamento é a seleção e a moagem do material extraído. É também usada pela Luzenac, a maior produtora mundial de talco em suas minas nos Pireneus franceses.

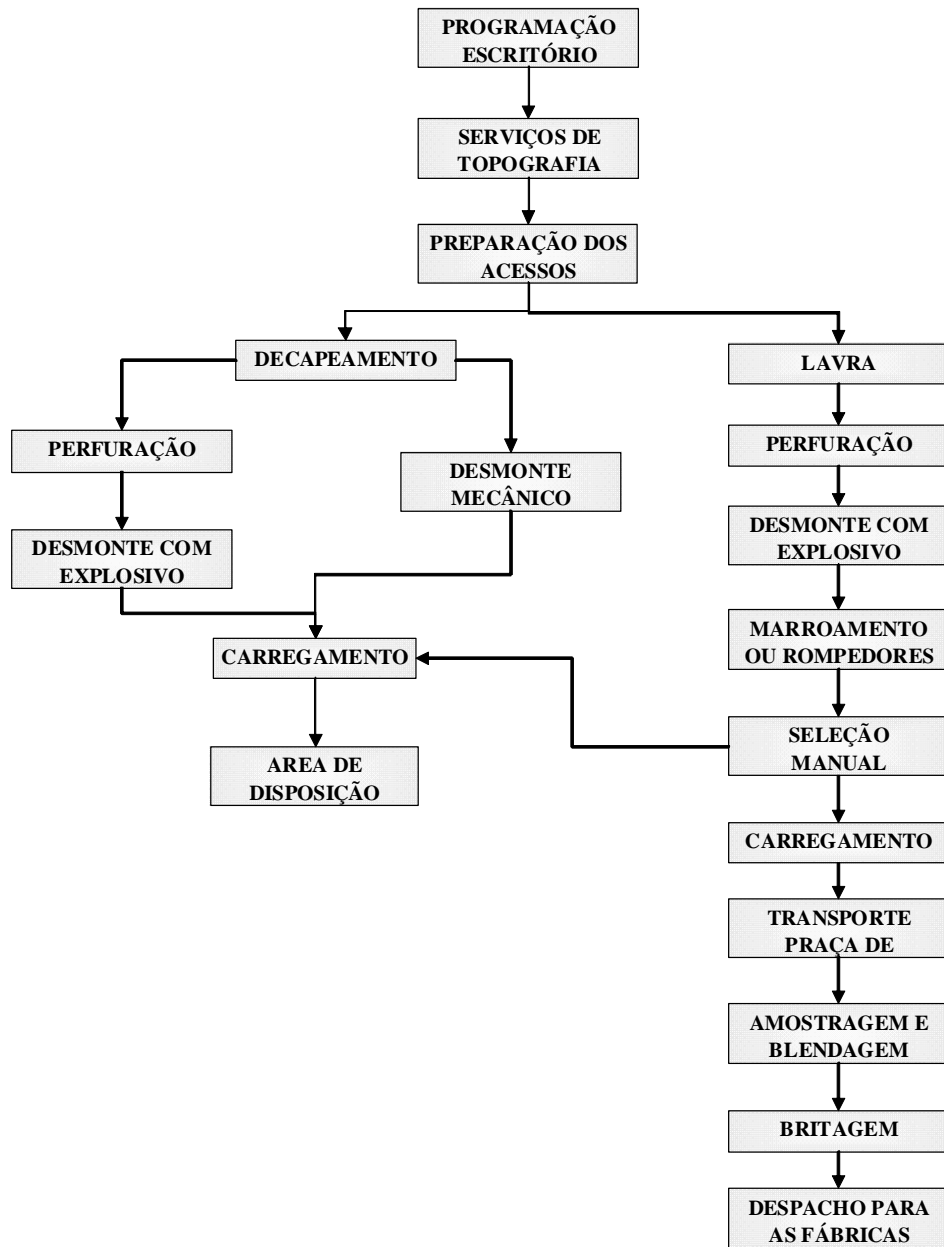


FIGURA 6 - Fluxograma simplificado das operações da mina na Serra dos Ferreiras.

## 4 GEOLOGIA REGIONAL

### 4.1 Introdução

O mapa geológico escala 1:100.000 da área coberta pela Folha Pará de Minas (SE-23-Z-C-IV), gerado pelo convênio de cooperação técnico-científica entre a UFMG e o Serviço Geológico do Brasil, cuja razão social é Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), concluído em fevereiro de 2006, expõe a evolução do conhecimento geológico da região onde foram realizadas a integração e reavaliação total ou parcial das informações preexistentes, associado a diversas bases de dados. No contexto geológico, a folha de Pará de Minas está situada em pleno domínio do embasamento meridional do Cráton do São Francisco (Almeida 1977), com o predomínio dos terrenos gnáissicos migmatíticos meso a neorqueanos e a sequência *greenstone belt* neoarqueana do Supergrupo Rio das Velhas (Romano 2006).

A região onde se encontra a área de interesse é considerada o prolongamento do Quadrilátero Ferrífero (FIG. 7).

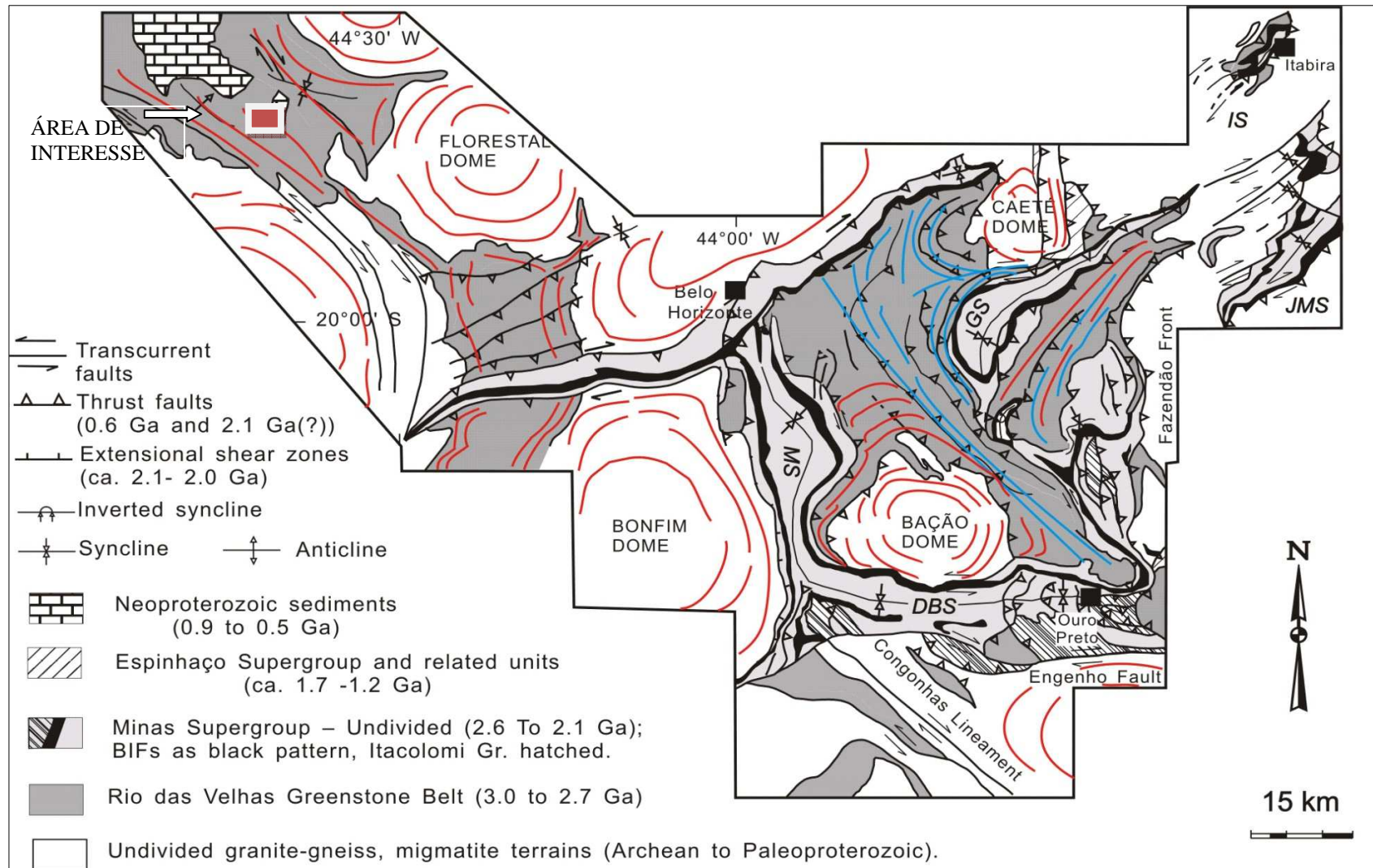


FIGURA 7 - Esboço geológico da região do Quadrilátero Ferrífero–MG.

Fonte: modificado de Renger *et al.* (1994).

## 4.2 Trabalhos anteriores

Os principais trabalhos existentes sobre a geologia da região de Pará de Minas - Pitangui são listados a seguir.

- Guimarães & Barbosa (1934, *in* Romano 2006) consideram a região um prolongamento da “Série Minas”, segundo um conceito generalizado na época, que correlacionava todas as sequências que continham metassedimentos epimetamórficos e minério de ferro bandado pertencente a essa série.
- Leinz (1938) & Moraes (1938) descreveram a geologia das rochas peraluminosas e propuseram uma gênese hidrotermal para elas, admitindo um protólito metassedimentar. Os estudos desses autores foram realizados principalmente em torno da cidade de Pará de Minas.
- Grossi Sad (1968, *in* Romano 2006) é a primeira referência do posicionamento da grande estrutura dobrada de Pitangui como pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas.
- Costa & Romano (1976, *in* Romano 2006) consideram pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas a sequência de rochas metavulcânicas e metassedimentares na faixa Mateus Leme - Pará de Minas - Pitangui.
- Richter & Lacerda (1975) observaram elevado número de corpos de agalmatolitos intercalados em quartzitos correlatos do Supergrupo Minas, nas regiões de Pitangui e Pequi. A cianita foi considerada resultante de condições localmente mais elevadas de pressão e temperatura (por exemplo, zonas de falhas) e a pirofilita um produto de metamorfismo retrógado da cianita. Devido às grandes distâncias entre os agalmatolitos e o granito de Pará de Minas, foi desconsiderada a possibilidade de vincular o último à gênese daquelas rochas peraluminosas.
- Menezes Filho *et al.* (1977) correlacionaram as sequências das rochas da região de Pitangui com as da Serra do Espinhaço, citando semelhanças litológicas e estruturais entre elas.
- Ladeira (1981) relatou várias ocorrências de lavas almofadas ricas em varíolas em xistos verdes do Grupo Nova Lima, parte inferior do Supergrupo Rio das Velhas, na localidade de Velho da Taipa, sul de Pitangui, tipificando essa unidade arqueana como um cinturão de rochas verdes.

- Teixeira & Aita (1986) ressaltaram derrames *komatiitos* na região entre Mateus Leme e Pitangui e propuseram uma origem dos depósitos de pirofilita ligada a processos hidrotermais no fundo oceânico.
- Romano (1989) salientou o enriquecimento em alumínio pré ou sinmetamórfico, expondo duas hipóteses para explicá-lo: dessilicificação hidrotermal de arenitos caoliníticos devido às intrusões graníticas a aproximadamente 2,4 Ga. e à deformação regional em torno de 2,0 Ga.; alteração hidrotermal por atividades exalativas pós-vulcânicas, produzindo alteração *in situ* ou afetando depósitos sedimentares constituídos pelo retrabalhamento e transporte de produtos peraluminosos.
- Romano (1990), para explicar as assembleias mineralógicas das rochas peraluminosas, propôs uma combinação de alteração metassomática por exalações pós-vulcânicas, seguida por metamorfismo regional e retrometamorfose.
- Teixeira & Kuyumjian (1991) sugeriram um modelo de alteração por fontes termais para explicar a intensa alteração aluminosa presente em partes diferentes da sequência estratigráfica do *greenstone* Rio das Velhas, entre as localidades de Mateus Leme e Pitangui. A fonte de calor para o sistema geotérmico seria o granito subvulcânico de Pará de Minas.
- Romano & Carmo (1992) reiteraram uma alteração hidrotermal do tipo pós-vulcânica de alto fluxo térmico, processando-se a partir de um sistema fissural com mais de 50 km de extensão, em condições mesotermiais e aberto provavelmente por fraturamento hidráulico.
- Carmo & Romano (1996) destacaram a questão da origem dos depósitos de rochas peraluminosas com proposição de uma síntese de todos os trabalhos regionais. E baseiam-se na evolução tectônica e na alteração hidrotermal clássica ligada à circulação de fluidos pós-vulcânicos como responsável pela origem dos depósitos de rochas peraluminosas da faixa Mateus Leme - Pará de Minas - Onça do Pitangui.
- Romano & Paiva (1997) evidenciaram o papel da tectônica transcorrente como responsável pela alteração hidrotermal e pelo posicionamento crustal de corpos granitoides. O caráter colisional de corpos granitoides acomodados ao longo do denominado Lineamento de Pitangui foi geoquimicamente demonstrado por Romano *et al.* (1995).

- Heineck (1997) também enfatizou o papel da tectônica transcorrente compressiva no processo de alteração hidrotermal, com estudo geológico da região de Mateus Leme, no prolongamento sudeste das estruturas de Pará de Minas.
- Romano (2006) apresentou um trabalho sistemático de mapeamento geológico que cobriu a Folha Pará de Minas 1:100.000: SE-23-Z-C-IV, além de uma síntese de toda a bibliografia citada anteriormente, reforçando as ideias mais aceitas sobre a evolução geológica para a região, contextualizando as rochas peraluminosas quanto à sua gênese e evolução tectônica.
- Araújo *et al.* (2007) elaboraram um mapeamento geológico, na escala 1:10.000 da Região da Serra dos Ferreiras, Onça de Pitangui, referente aos Trabalhos Geológicos de Graduação (IGC/UFMG).

### **4.3 Litoestratigrafia**

#### **4.3.1 Embasamento cratônico**

O embasamento cratônico é caracterizado na região por rochas de idade pouco precisa que se enquadram entre o Arqueano até o Neoproterozoico, que são: anfibolito, episienito, gabro porfirítico e rochas metamáficas, serpentinito e quartzo hidrotermal (Romano, 2006) e por dois domínios separados ao sul e norte do lineamento Pitangui, domínio do Complexo Divinópolis ao sul e domínio do Complexo Belo Horizonte ao norte (QUADRO 4).

QUADRO 4  
Coluna litoestratigráfica da região

COLUNA LITOESTRATIGRÁFICA				
FANEROZÓICO	NEÓGENO	<u>Quaternário</u> : coberturas aluvionares de sedimentos inconsolidados		
		<u>Terciário-Quaternário</u> : Leques coluvionares e coberturas eluvionares detrítico-limoníticas		
Discordância Angular e Erosiva				
PROTEROZÓICO	NEOPROTEROZÓICO	GRUPO BAMBUI	<u>Formação Sete Lagoas</u> : Unidades de cobertura neoproterozóica e margas calcíticas	
			<u>Formação Carrancas</u> : diamictitos, varvitos e sedimentos pelágicos associados	
Enxames de diques básicos do Meso ao Neoproterozóico (900 e 2000 Ma)				
Discordância Angular e Erosiva				
NEOARQUEANO	SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS	GRUPO MAQUINÉ	Rochas de posicionamento indeterminado: Veios de quartzo fumê	
			<u>Unidade metassedimentar de quartzitos micáceos e lentes de metaconglomerados</u>	
			<u>Unidade metassedimentar de quartzitos puros e lentes de metaconglomerados</u>	
		Discordância Angular e Erosiva		
		GRUPO NOVA LIMA	SEQUÊNCIA METAVULCANO-SEDIMENTAR E METASSEDIMENTAR	
			<u>Unidade metassedimentar</u> : filito muscovítico e metassiltitos com intercalações de filito-clorítico	
			<u>Unidade de rochas hidrotermalmente alteradas</u> : rochas peraluminosas (agalmatolitos) indivisas e quartzito hidrotermal	
			<u>Unidade metavulcano-sedimentar</u> : Metatufos, níveis metapiroclásticas, metagrauvas e metassedimentos associados	
			SEQUÊNCIA METAÍGNEA E METASSEDIMENTAR	
		<u>Unidade Metassedimentar</u> : Metachert e filito carbonoso		
<u>Unidade Metaultramáfica e Metamáfica</u> : Clorita-xisto e talco-xisto				

Fonte: modificado de Romano (2006).

### 4.3.2 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas foi primordialmente definido como Série Rio das Velhas por Dorr II *et al.* (1957), composta de uma sequência de rochas metassedimentares xistosas e metavulcânicas. O termo Supergrupo Rio das Velhas foi proposto por Loczy & Ladeira (1976). Para a região, Romano (2006) considerou a mesma divisão estratigráfica clássica do Quadrilátero Ferrífero, devido às semelhanças litológicas e sua quase continuidade física com aquela região

O Supergrupo Rio das Velhas foi dividido por Dorr II *et al.* (1957) em dois grupos: o Grupo Nova Lima e o Grupo Maquiné, descritos a seguir.

#### A - Grupo Nova Lima

Na região abrangida pela Folha de Pará de Minas em escala 1:100.000, Romano (2006) dividiu o Grupo Nova Lima nas seguintes sequências:

- Sequência metaígneia e metassedimentar composta das unidades metaultramáfica e metamáfica (serpentinito, clorita, anfibolito e talcoxisto), metassedimentar (*metachert*, filito muscovítico e filito carbonoso), metamáfica e metaintermediárias (rochas metavulcânicas);
- sequência metavulcano-sedimentar e metassedimentar constituída pela unidade metavulcano-sedimentar (rochas metapiroclásticas, metatufos, metaritmio, metagrauvaca e metassedimentos associados); unidade metassedimentar (filito muscovítico e clorítico, metaturbiditos, quartzitos, *metachert*, filito carbonoso e níveis vulcanoclásticos) e unidade de rochas hidrotermalmente alteradas que afetaram não só a base do Supergrupo Rio das Velhas, mas todas as rochas regionais, gerando produtos de alto teor de alumínio, conhecidos como rochas peraluminosas ou agalmatolitos.

Na região da Serra dos Ferreiras, fortes indícios mostram que são derivadas dos tufos vulcânicos com intercalações metassedimentares; na região de Pará de Minas, são, aparentemente, e na falta de dados mais convincentes, provenientes da alteração hidrotermal de granitos e gnaisses.

## **B - Grupo Maquiné**

O Grupo Maquiné encontra-se em contato discordante ou gradacional com o Grupo Nova Lima (Dorr II 1969). Apesar de ocorrências restritas, o Grupo sustenta as formas de relevo mais expressivas da região. A rocha quartzítica típica é um quartzito mal selecionado com grãos arredondados, bandamento composicional frequente (areia-silte-argila) e níveis conglomeráticos. Trata-se de uma sequência molássica, perfeitamente correlata à do Quadrilátero Ferrífero, apesar da falta de continuidade física entre elas (Romano 2006).

Esse grupo é composto de quartzo-micaxisto, com intercalações de quartzitos micáceos, metaconglomerados, quartzitos e filitos e é representado na região por quartzitos, quartzitos micáceos, micaxisto, níveis filíticos e de metaconglomerados oligomíticos e polimíticos (Romano 2006).

### **4.3.3 Granitoides**

#### **A - Granitoides Sin a tarditectônicos**

Esta divisão compreende os corpos da Suíte Intrusiva Mato Dentro e o Maciço Granitoide de Maravilhas - Cachoeira da Prata. O primeiro é denominado na região oeste de Mateus Leme e trata-se de uma unidade com granitoides biotíticos de grão grosso datados por Romano (1989) em 2.755 (+14,-13) Ma, pelo método U-Pb em zircões. A Suíte Intrusiva Mato Dentro engloba os corpos graníticos, Meireles, Casquilho, Conceição do Pará e Pará de Minas, que estão alinhados na direção sudeste-noroeste, representando porções alojadas nos gnaisses encaixantes.

O Maciço Granitoide Maravilhas - Cachoeira da Prata foi estudado por Oliveira (1999), sendo datado em  $2.714 \pm 2$  Ma, pelo método U-Pb e dividido com base na geoquímica e petrografia em dois corpos: corpo I, caracterizado por apresentar composição granítica, peraluminosa e com teores de  $\text{SiO}_2$  entre 73,03 e 75,4% e  $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ , e corpo II, de composição granodiorítica a tonalítica, sendo dividido em três fácies petrográficas: Cachoeira do Mato, Capelinha e Passagem Boa.

## **B - Granitoides tarditectônicos**

São classificadas como granitoides tarditectônicos algumas *fácies* petrográficas pertencentes ao Maciço Granitoide de Florestal (Perillo *et al.* 1998; Romano 1989; Romano & Noce 1995). Tal Maciço foi datado pelo método U-Pb em (2.593 ±18,-19 Ma) por Romano (1989). O corpo de Florestal possui forma amendoada, com o eixo maior de direção noroeste-sudeste, sendo dividido em quatro *fácies* petrográficas: Caio Martins, Padre João, Lagoinha e Serra do Tavares.

### **4.3.4 Diques básicos**

A ocorrência de diques básicos é bastante significativa e estende-se desde a base até o topo do Supergrupo Rio das Velhas. Esses diques foram datados por Teixeira & Kuyumjian (1991) pelo método K-Ar. Baseado nessa datação, Chaves (1996) estabeleceu todas as gerações de diques básicos, em que a mais antiga corresponderia à rocha metamorfizada em anfibolito, com direção de aproximadamente N10-30W e N50-70W e gerada durante o Ciclo Transamazônico em resposta a uma compressão SE-NW. A mais nova de direção, aproximadamente N30-70W, é correlacionada ao ciclo brasileiro e é caracterizada por rochas como basaltos toleíticos. Os diques básicos encontram-se espalhados por toda a região, sendo identificadas em fotos aéreas por apresentarem mudança na tonalidade no terreno, com aparente contraste nas fotos (geralmente são feições lineares na forma de cristas).

### **4.3.5 Grupo Bambuí**

O Grupo Bambuí é composto de metassedimentos argilo-carbonáticos capeados por um pacote de sedimentos arenosos. Várias subdivisões do Grupo Bambuí foram propostas por diversos autores, entre eles Branco & Costa (1961) e Dardene (1978). No presente trabalho, será considerada a subdivisão proposta por Branco & Costa (1961), na qual o Grupo Bambuí é constituído por seis formações que são as seguintes, da base para o topo: Carrancas (conglomerados e diamictitos de origem glacial), Sete Lagoas (margas calcilitos e calcarenitos), Serra de Santa Helena (pelitos com siltitos, argilitos, ardórsias,

folhelhos esverdeados, calcários e margas), Lagoa do Jacaré (calcários pretos a cinza), Três Marias (siltitos, arcóseos e arenitos arcóseos) e Serra da Saudade (siltitos, folhelhos e ardósias).

Essas formações constituem parte de uma sequência plataformal que marca uma transgressão marinha generalizada sobre o Cráton São Francisco.

Na região de estudo, foram caracterizadas apenas duas formações que compõem tal grupo: Formação Sete Lagoas - representada por dololutito, calcilutito com nódulos de *chert*, calcário e margas indiferenciadas; e formação Carrancas - caracterizada por varvito, diamictito, arenito grauvaquiana, arenito com concreções ferruginosas, arcósio e subarcósio de matriz clorítica.

#### **4.4 Contexto tectônico**

O principal acidente tectônico da região é o denominado Lineamento Pitangui (Romano & Noce, 1995; Romano & Paiva 1997), que representa a colisão entre dois núcleos de idade arqueana: o Complexo Belo Horizonte ao norte e o Complexo Divinópolis ao sul, gerando entre os mesmos uma zona colisional de direção noroeste-sudeste com largura máxima de 20 quilômetros, que materializa pelo menos três zonas principais de cisalhamentos (FIG. 8).

Na zona colisional, desenvolveu-se uma bacia oceânica onde se depositou a sequência *greenstone belt* do Rio das Velhas. A idade do lineamento é mesoarqueana e o sentido é sinistral, segundo indicadores cinemáticos mais antigos (Romano 2006).

A região é marcada por dois eventos deformacionais, D1 e D2. O primeiro é constituído por duas fases de deformações principais, Dn e Dn+1 (Romano 1989; 1993a; Heineck 1997). É de idade arqueana, marcado por um regime de natureza predominantemente dúctil e caracterizado por dobras apertadas cujas direções axiais variam de NW-SE a NE-SW, que indicam a disposição em leque do plano axial (Romano 1993a). Tais dobras encontram-se associadas a um plano de xistosidade Sn que, em geral, apresenta-se transpondo o acamamento So, sempre que visível. A segunda fase, Dn+1, é de regime

dúctil a dúctil-rúptil, exerce influência sobre a região desde o Arqueano ao Transamazônico e produz dobras abertas com planos axiais variando de NE-SW a NW-SE.

O segundo evento, D2, é caracterizado pela tectônica distensiva de idade brasiliana marcada pelo basculamento de camadas por gravidade das rochas do Grupo Bambuí. No entanto, não são visíveis marcas de deformação compressiva em tais rochas, sugerindo que esse evento foi apenas um pulso de relaxamento provocado pela frente de empurrão da Serra do Espinhaço, uma vez que esta se encontra a cerca de poucas centenas de quilômetros.

Eventos posteriores tal como a reativação cenozoica são evidenciados a partir da existência de terraços aluvionares elevados, assim como falhas recentes que deslocam os depósitos de superfície.

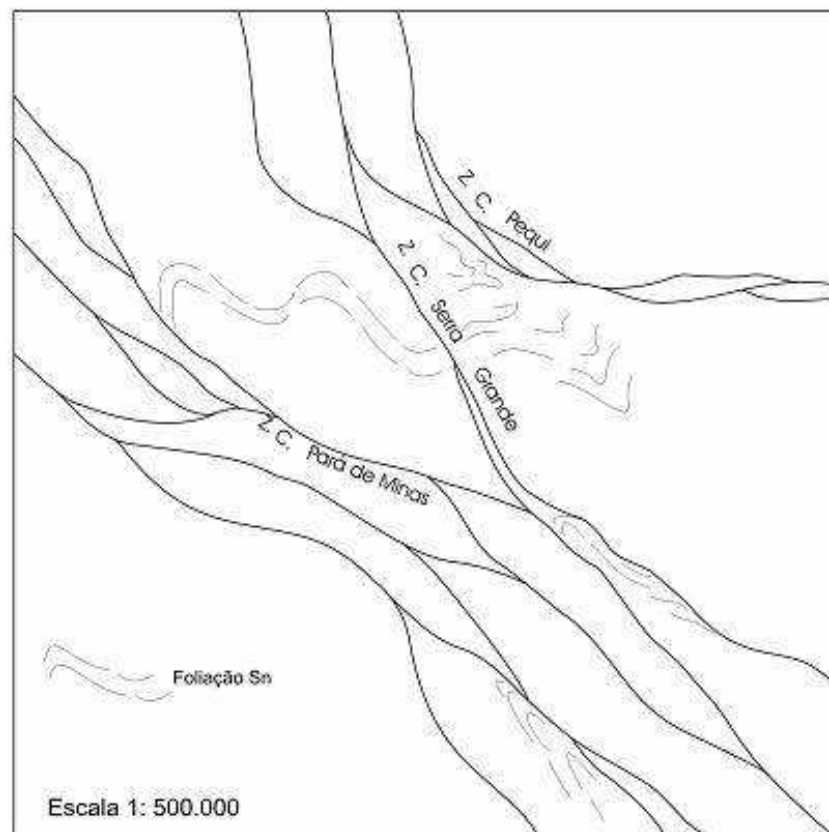


FIGURA 8 - Lineamento Pitangui e as principais zonas de cisalhamento associadas.

Fonte: Romano (2006).

## **5 TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA DE ESTUDO**

### **5.1 Metodologia**

A metodologia aplicada na realização dos estudos foi dividida nas seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica da geologia dos principais depósitos de agalmatolitos no Brasil e no exterior.
- Revisão bibliográfica de conceitos e aplicações dos agalmatolitos como minerais industriais;
- coordenação dos trabalhos de campo de dois trabalhos geológicos de graduação (TGs) realizados em convênio com o Instituto de Geociências - IGC/UFMG e a Magnesita Refratários S.A. (TG 2007);
- caracterização dos diversos tipos de agalmatolitos presentes no depósito da Serra dos Ferreiras, com os ensaios executados nos laboratórios do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa (CMTC) da UFMG e do CPqD da Magnesita Refratários S.A.;
- mapeamento geológico de detalhe do depósito da Serra dos Ferreiras com reavaliação dos principais tipos de agalmatolitos de interesse para a indústria;
- organização dos dados obtidos durante os levantamentos e os resultados das campanhas de sondagem anteriores e atuais;
- ensaios tecnológicos preliminares executados no laboratório (CPqD) da Magnesita Refratários S.A. em amostras típicas agalmatolitos selecionados;
- elaboração de um mapa geológico na escala 1:1. 000 das principais frentes de extração;
- elaboração final da dissertação.

### **5.2 Geologia local**

O enfoque do trabalho desta dissertação é a caracterização dos principais tipos de agalmatolito presentes no Serra dos Ferreiras, no município de Onça de Pitangui, e suas possíveis aplicações industriais.

Apesar da existência de diversos estudos geológicos regionais, em especial o mapeamento da Folha Pará de Minas, SE-23-Z-C-IV, 1:100.000 (Romano 2006), verificou-se a necessidade de um mapeamento geológico em escala semirregional, para melhor conhecimento da zona de alteração hidrotermal, onde ocorrem os diversos depósitos de agalmatolito e a identificação dos principais tipos, com base em análises químicas, petrográficas e estruturais e suas correlações com os tipos tradicionalmente usados na indústria de refratários.

### **5.2.1 Litoestratigrafia**

Os principais tipos litológicos encontrados na Serra dos Ferreiras são as rochas hidrotermalmente alteradas, compostas de agalmatolitos e hidrotermalitos associados às rochas metatufáceas e metassedimentares cujo conjunto de rochas pertence à sequência metavulcano-sedimentar e metassedimentar do Grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas.

#### **A - Sequência metavulcanossedimentar e metassedimentar**

A Serra dos Ferreiras tem como domínio litológico principal a sequência metavulcanossedimentar e metassedimentar, que está representada por rochas alteradas tanto intempérica como hidrotermalmente e fortemente deformadas ductilmente. Essa sequência é constituída por duas unidades; uma inferior, de maior contribuição vulcanossedimentar, e uma superior, de maior contribuição sedimentar. Como a alteração hidrotermal peraluminosa desenvolveu-se em ambas as unidades dessa sequência, Romano (2006) considerou uma nova unidade denominada unidade de rochas hidrotermalmente alteradas, estratigraficamente entre as sequências metavulcanossedimentar e metassedimentar.

##### **▪ Unidade metavulcanossedimentar**

O metatufó é o principal representante da unidade metavulcanossedimentar, estando localizado na porção central, sul e nordeste da área de estudo.

Tal rocha encontra-se frequentemente intemperizada sob a forma saprolítica, porém preservando estruturas como foliação milonítica e clivagem de crenulação, estando por vezes já decomposta, dando origem a solo de coloração violácea. Níveis de matéria carbonosa e veio de quartzo *fumé* milimétricos a centimétricos dobrados são observados na maior parte dos afloramentos. Lajedos de rocha fresca apresentando aspecto milonítico de pequeno a médio porte e coloração esverdeada são restritos na área mapeada e na encosta da Serra dos Ferreiras.

O metatufo é caracterizado pelo bandamento rítmico, pintas brancas caracterizadas como restos de feldspato (FIG. 9) e granulometria variável, que o classificam, por vezes, como metagrauvaca e metaconglomerado que, em geral, contêm clastos centimétricos. A metagrauvaca é mais frequente que o metaconglomerado e aflora ao longo da estrada que dá acesso às frentes das minas Lamelar e Esperança, pertencentes à empresa Magnesita Refratários S.A. Lajedos de rocha apresentando aspecto milonítico de pequeno a médio porte e coloração esverdeada são restritos na encosta da Serra dos Ferreiras.



FIGURA 9 - Fotos do metatufo.

À esquerda a rocha sã em processo de alteração e à direita a rocha alterada com nível feldspático.

- **Unidade de rochas hidrotermalmente alteradas**

A unidade de rochas hidrotermalmente alteradas foi definida quando do mapeamento da folha de Pará de Minas (Romano 2006). Um dos critérios de definição foi o fato delas encontrarem-se aflorando em uma larga porção do terreno e possuírem características

petrográficas *sui generis*, o que as diferenciam de quaisquer rochas sedimentares, metamórficas ou magmáticas conhecidas. Trata-se também de uma unidade sem posição litoestratigráfica definida, situando-se, na folha de Pará de Minas, mais ou menos entre as rochas vulcanossedimentares e metassedimentares do topo do Grupo Nova Lima. Porém, podem ser encontradas em qualquer posição litoestratigráfica no contexto desse grupo. A condição necessária e suficiente para que ocorram é a existência de uma deformação dúctil proeminente e alta razão fluido/rocha durante essa deformação.

As rochas afetadas por esse processo de alteração hidrotermal foram transformadas em uma associação de minerais aluminosos, dando origem às rochas denominadas agalmatolitos ou simplesmente peraluminosas. No Brasil, foram descritas primordialmente por Moraes (1938) e Leinz (1938) como sendo ricas em pirofilita, mineral este derivado da alteração retrometamórfica da cianita, originalmente produzida por metamorfismo de sedimentos caulínicos. Em trabalhos posteriores, foi observada mineralogia mais abrangente, identificando-se rochas com conteúdo variável de muscovita, caulinita, diásporo, coríndon e polimorfos do  $Al_2SiO_5$ .

A hipótese mais aceita para a origem dos agalmatolitos, principalmente após os trabalhos de Paiva (1996), Romano & Paiva (1997) e Heineck (1997), está na constituição da alteração hidrotermal concomitantemente com a instalação de uma zona de cisalhamento. Essas zonas de cisalhamento são muito frequentes na região e estão de acordo com a característica colisional da bacia de sedimentação do Supergrupo Rio das Velhas. Romano (2006) supôs que os fluidos hidrotermais que geraram a alteração eram produtos da desidratação da própria pilha sedimentar e vulcanossedimentar durante o encurtamento crustal. Outra hipótese considerada é a derivação das rochas peraluminosas a partir de paleossolos (Romano 2006). No entanto, essa possibilidade deve ser analisada com cautela, uma vez que deve ser considerado o volume de paleossolo existente. Na região, essa hipótese é reforçada, localmente, pela existência de níveis finos de rochas relativamente raras como os cloritoiditos, que contêm mais de 90% de Fe-cloritoide e por vezes Fe-clorita, sugerindo, portanto, que são prováveis paleossolos arqueanos. As outras rochas que contêm porções poucos significativas de Fe-cloritoide, podem também não ser derivadas de paleossolos.

Resumindo, o modelo atual estabelecido para a gênese dos agalmatolitos é o de alteração hidrotermal ao longo de uma zona de cisalhamento (Romano 2006). Nesse modelo, a alteração hidrotermal funciona como no modelo pós-vulcânico clássico, sendo possível reconhecer zonas de predominância mineralógica: a) zona peraluminosa - presença de coríndon, polimorfos  $Al_2SiO_5$ , muscovita e minerais retrógrados, tais como diásporo, pirofilita e caulinita; b) zona muscovítica - muscovita e quartzo, com pirofilita e caulinita subordinadas.

Além desses minerais, ocorrem, associadas, quantidades variáveis de cloritoide, turmalina e rutilo. Essas zonas, contudo, têm abrangência local e regional muito variável, sendo possível, no mesmo depósito, encontrarem-se tipos litológicos variados e em espessuras também diversas.

No depósito estudado, todos os tipos litológicos característicos de cada zona foram identificados. Mesmo os produtos de mais alta alteração, tal como o coríndon, podem ser reconhecidos em lâmina delgada como cristais relíquias, quase ou totalmente substituídos por diásporo,

Quanto aos agalmatolitos, são facilmente reconhecidos no campo, em função das suas peculiaridades petrográficas, e em fotos aéreas devido à sua morfologia representando cristas pontiagudas alongadas, realçadas topograficamente. Isto em função dos seus minerais aluminosos, que são resistentes ao intemperismo químico, o que lhes confere resistência ao intemperismo físico.

Os agalmatolitos são classificados como rochas de alto teor de  $Al_2O_3$ ; variados teores de coríndon, muscovita, polimorfos  $Al_2SiO_5$  (destacando-se a andaluzita e cianita) como mineralogia metamórfica primária; e diásporo, pirofilita e caulinita como mineralogia retrometamórfica (Romano 1989, 1993b). É importante ressaltar que a denominação agalmatolito não está relacionada ao processo de alteração hidrotermal, mas sim a um tipo de rocha peraluminosa.

As formas dos corpos são de dimensões variáveis, porém, sempre preservam o aspecto sigmoidal, que sugere uma aparência sintectônica. No mapa geológico de semidetalhe (ANEXO A), os agalmatolitos são representados como sigmoides de tamanhos e

espessuras variáveis, porém é importante salientar que o aspecto sigmoidal se propaga desde a escala de afloramento até a escala microscópica. Os agalmatolitos encontram-se, frequentemente, fraturados e/ou foliados, além de apresentarem estruturas nodulares peraluminosas esféricas que variam de centimétricas a métricas, encontradas na frente de lavra Lamelar (FIG. 10).



FIGURA 10 - Foto dos nódulos peraluminosos no agalmatolito.

Os agalmatolitos da Serra dos Ferreiras são provavelmente derivados da sequência de metatufos vulcânicos com intercalações metassedimentares, sendo facilmente observados nas frentes de lavra dessa serra, onde se observam camadas de material essencialmente quartzítico (quartzito hidrotermal) que são prováveis camadas de *metachert* hidrotermalizadas que se intercalam com os metatufos.

### 5.3 Reavaliação geológica do depósito da Serra dos Ferreiras

#### 5.3.1 Metodologia

Obedecendo a uma sistemática preestabelecida para a realização dos trabalhos de pesquisa mineral do depósito de agalmatolito da Serra dos Ferreiras, foram desenvolvidas as seguintes atividades:

- Levantamento topográfico: os serviços de topografia consistiram no levantamento do vetor de amarração, locação de uma linha-base e benfeitorias. Prosseguiram com a locação dos trabalhos de pesquisa (afloramentos, furos de sonda, acessos e

levantamento planialtimétrico de detalhe de toda a área pesquisada, resultando em uma planta topográfica, base do mapa geológico de detalhe);

- mapeamento de detalhe do depósito: um mapeamento geológico foi executado na escala 1: 1.000, a partir de base planialtimétrica com curvas de nível de 5 em 5 m, levantada no campo pelo equipamento: Estação Total Leica modelo TC600 SN° 500768 – PAT: N° I14958;
- sondagem de detalhe: foi executada uma campanha complementar de sondagem rotativa com 15 furos, com profundidades variando entre 45,00 e 75,00 metros, perfazendo um total de 950 metros lineares de sondagem. Os testemunhos foram descritos e os intervalos de interesse foram serrados, amostrados e enviados ao laboratório da Magnesita Refratários S.A.;
- amostragem e análises químicas e físicas: 93 amostras foram coletadas a partir de critérios que representam toda a porção mineralizada, sendo, inicialmente, 13 amostras de afloramentos para a caracterização dos tipos de agalmatolito e as restantes nos testemunhos de sondagem. Os resultados foram usados na estimativa dos recursos geológicos. As amostras foram analisadas no laboratório da Magnesita Refratários S.A. (CPqD);
- mapa e perfis geológicos de detalhes: de posse dos resultados dos trabalhos de campo e laboratório, foram elaborados o mapa e os perfis geológicos de detalhe.

### **5.3.2 Agalmatolitos da Serra dos Ferreiras**

Com o mapeamento geológico ficou comprovado que a ocorrência de agalmatolito constitui uma faixa contínua de largura média de 120 metros, cujo comprimento se estende por toda a área. É um pacote heterogêneo composto de tipos litológicos com características físicas, mineralógicas e químicas bastante variáveis, perceptíveis, comumente em afloramentos e, às vezes, até em amostras de mão.

De maneira muito ampla, os agalmatolitos do depósito foram divididos em dois grupos:

- Agalmatolitos compactos e/ou maciços: predominam os tipos de tonalidade esverdeada com variações de clara a cinza creme, em geral macios, untuosos ao tato, de estrutura maciça a xistosa, constituídos invariavelmente de pirofilita verde

de formas irregulares, às vezes fibro-radiada, muscovita e cianita em proporções bastante variáveis;

- agalmatolitos semialterados a alterados: predominam os tipos de tonalidades verde-claro a esbranquiçadas, de xistosidade bem definida, textura granular e porfiroblástica, encerrando elevada porcentagem de quartzo livre, pirofilita, muscovita e, não raro, cianita e pontuações de hidróxido de ferro disseminadas na rocha. Estes agalmatolitos, na mina, são conhecidos como agalmatolitos lamelares e, no presente trabalho, foram denominados de agalmatolitos indivisos (*arnmhai*).

#### **5.4 Metodologia usada na caracterização química e mineralógica dos agalmatolitos**

Como apenas os agalmatolitos compactos e/ou maciços têm aplicações industriais, o foco dos trabalhos foi exclusivamente neste grupo. Apesar da diversidade da sua assembleia mineral, procurou-se caracterizar as amostras típicas para cada zona de alteração hidrotermal. Englobaram-se os tipos distintos que ocorrem com mais representatividade e que poderão garantir fornecimento regular, caso suas características químicas, mineralógicas e físicas sejam aceitas pelo mercado. Isto é, foram considerados, principalmente, aqueles tradicionalmente explorados pela Magnesita Refratários S.A.

Os trabalhos de caracterização dos tipos de agalmatolito foram inicialmente desenvolvidos por meio de análise química e mineralógica.

O fluxograma da FIG. 11 apresenta, de forma resumida, as técnicas empregadas na caracterização dos tipos de agalmatolito. Todas as técnicas utilizadas estão descritas no decorrer do capítulo.

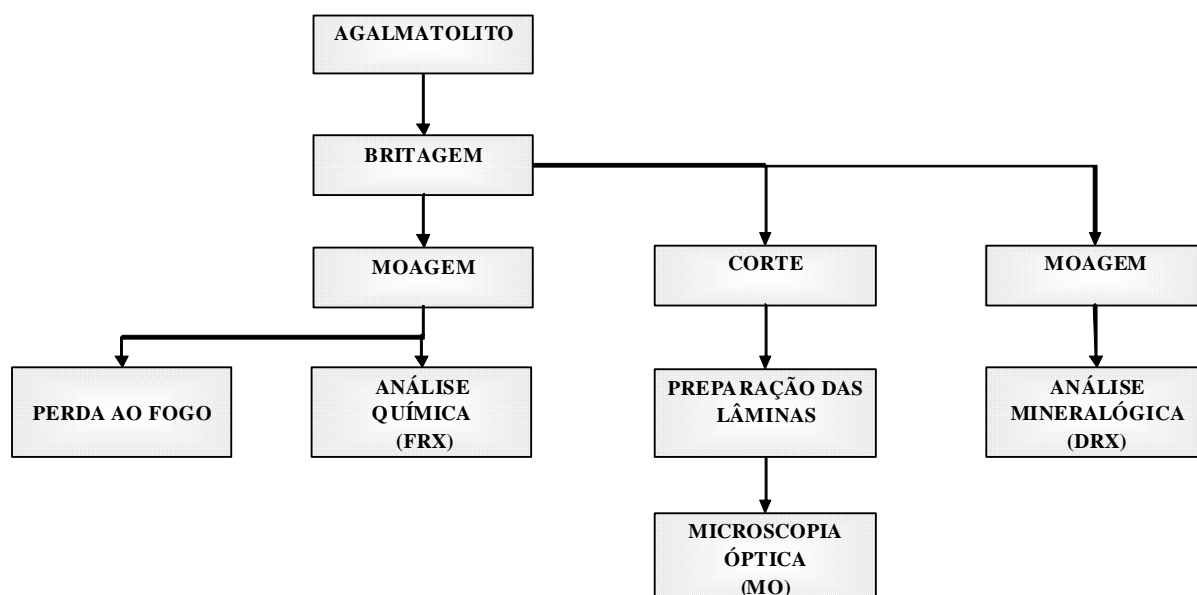


FIGURA 11 - Fluxograma das técnicas utilizadas nas caracterizações química e mineralógica

#### 5.4.1 Preparação das amostras para os ensaios

As amostras, após a coleta e classificação visual no campo, foram processadas no CPqD da Magnesita Refratários S.A. Seguindo-se os procedimentos adotados nesse laboratório, as amostras foram britadas e quarteadas.

Uma alíquota de cada amostra foi destinada ao CPMTC da UFMG para preparação de lâmina, com os objetivos de descrição microscópica e também análise mineralógica via difração de raios-X (DRX).

O restante de cada amostra foi analisado quimicamente por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) no CPqD da Magnesita Refratários S.A.

#### 5.4.2 Microscopia óptica (MO)

A microscopia é uma das principais técnicas analíticas para a identificação e quantificação das espécies minerais presentes; a determinação das associações minerais está entre as

principais características obtidas a partir da observação ao microscópio.

As microscopias ópticas de luz transmitida, para minerais transparentes, e de luz refletida, para minerais opacos, são provavelmente os métodos mais tradicionais de identificação mineralógica (Neumann *et al.* 2004, *in* Gomes 2007).

Os exames em lâminas delgadas por microscópio óptico com a luz transmitida das amostras típicas dos agalmatolitos foram realizados no CPMTC da UFMG e, juntamente com a descrição macroscópica desses tipos, encontram-se no APÊNDICE A.

#### **5.4.3 Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX)**

No CPMTC da UFMG foram feitas as análises de difração de raios-X de cinco amostras referentes aos tipos de agalmatolito da Serra dos Ferreiras subdivididos no presente trabalho, tendo como principal objetivo a caracterização das fases pirofilita e muscovita, uma vez que estas só são distinguidas por esse método.

O ensaio foi realizado utilizando-se um difratômetro de raios-X, X'pert PRO da marca *Panalytical*, tubo de cobre, potência de 40 kV e 45 mA.

#### **5.4.4 Análises químicas por fluorescência de raios-X (FRX)**

As análises químicas foram realizadas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), as amostras foram pulverizadas ( $< 0,45 \mu\text{m}$ ) e fundidas a  $1.200^\circ\text{C}$  em cadinhos de platina, uma relação média de 0,80 g de amostra para 8 g de fundente, tetraborato de lítio ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). Os ensaios foram realizados no espectrômetro de FRX *Philips Magix - Pro*, disponível no CPqD da Magnesita Refratários S.A.

#### **5.4.5 Perdas ao fogo (PFs)**

As determinações das perdas ao fogo (PFs) foram realizadas em um equipamento TGA - 601 da LECO Corporation disponível no CPqD da Magnesita Refratários S.A. As amostras foram pulverizadas ( $< 0,45 \mu\text{m}$ ), cadastradas em *software* específico e inicialmente calculada a umidade ( $110^\circ$ ) até o peso constante e, em seguida, as perdas ao fogo ( $110^\circ - 1.000^\circ\text{C}$ ) até peso constante.

#### **5.4.6 Composição química em base calcinada**

A partir dos dados das análises químicas, recalculou-se a percentagem dos óxidos sem as perdas ao fogo. Os resultados forneceram informações sobre a utilização dos agalmatolitos como matéria-primas para a produção de refratários.

### **5.5 Metodologia usada nos ensaios tecnológicos preliminares dos agalmatolitos**

O estudo dos tipos de agalmatolito da Serra dos Ferreiras foi desenvolvido, além do seu uso tradicional, que é na fabricação de refratários, também para utilização na indústria, como cargas minerais. Entre os setores de consumo de cargas minerais, o principal é a indústria de tintas, onde as cargas, de maneira geral, são conhecidas também por pigmentos extensores. Em formulações, as cargas mais brancas são as mais requisitadas, pois além de serem mais uniformes na cor, proporcionam mais economia de  $\text{TiO}_2$ , contribuindo significativamente para a redução do custo final da tinta. Segundo Bartholi (1998), os principais fatores que influenciam na escolha da carga mineral são: brancura, granulometria, brilho, reologia, tempo de dispersão, cobertura, custo.

Foram previamente selecionados entre os tipos até então estudados aqueles que, além de ocorrerem em maiores quantidades, apresentam teores mais baixos de minerais coloríficos. São os seguintes tipos: pirofilita-*fels* (agalmatolito *roseki*); pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (agalmatolito B1); muscovita-pirofilita agalmatolito (agalmatolito esverdeado); muscovita-xisto (agalmatolito canjica) e muscovita-quartzo agalmatolito (agalmatolito micado).

Amostras de 10 kg cada uma, representando os cinco tipos de agalmatolitos selecionados, foram enviadas ao CPqD da Magnesita Refratários S.A para a realização de ensaios tecnológicos preliminares. Para efeito de comparação foi também incluída uma amostra de agalmatolito da região de Mateus Leme, por se tratar de material de uso consagrado em cargas para tintas.

O fluxograma da FIG. 12 apresenta as principais atividades desenvolvidas nessa etapa do estudo.

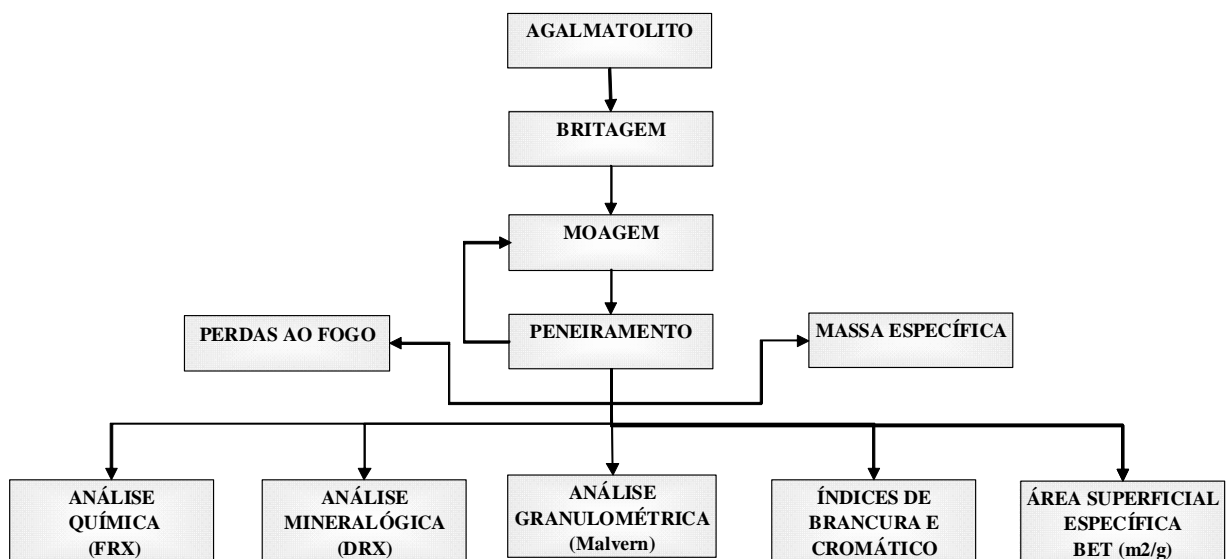


FIGURA 12 - Fluxograma das técnicas utilizadas nos ensaios tecnológicos.

### 5.5.1 Britagem

As amostras foram previamente britadas em um britador composto de uma mandíbula fixa e outra móvel. A abertura da boca de alimentação é de 160 x 240 mm, a abertura máxima da mandíbula é de 50 mm e a mínima de 15 mm.

### 5.5.2 Moagem

As amostras foram moídas em moinhos de bolas de porcelana até atingir 99,5% em uma granulometria abaixo de 45  $\mu\text{m}$ . Durante a moagem, em intervalos de tempo regulares, o

material era peneirado a úmido e apenas a fração acima de 45  $\mu\text{m}$  voltava a ser moída, evitando-se, assim, a produção de superfinos. O padrão de moagem de 45  $\mu\text{m}$  foi considerado, por ser uma granulometria facilmente alcançada por moinhos industriais, abaixo do qual é necessário o uso de micronizadores.

### **5.5.3 Análises químicas por FRX e perdas ao fogo (PFs)**

Os procedimentos foram os mesmos dos ensaios anteriormente realizados.

### **5.5.4 Análise mineralógica por DRX**

Com a inclusão da amostra de agalmatolito de Mateus Leme, foi necessária a realização da análise de DRX. O ensaio foi realizado utilizando-se um difratômetro de Raios-X marca *Panalytical*, modelo PW 1830, com radiação cobre Ka ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ), potência de 40 kV e 30 mA., disponível no CPqD da Magnesita Refratários S.A.

Para interpretação dos resultados, utilizou-se o programa *X`Pert HighScore*, da marca *Philips*, que usa o banco de dados *International Center for Diffraction Data* (ICDD) para identificação das fases.

### **5.5.5 Massa específica**

O ensaio para a determinação de peso específico foi realizado em um picnômetro a hélio, marca *Quantachrome*, modelo 8PY-3, disponível no CPqD da Magnesita Refratários S.A. Num volume conhecido, tem-se o peso da amostra. Fazem-se vácuo e injeção de hélio. O volume de hélio deve ser capaz de ocupar o volume e preencher o volume de vazios existentes na amostra. Subtraindo-se esses vazios, tem-se o volume real. A massa específica será massa/volume sem vazios.

### 5.5.6 Análise granulométrica dos particulados - *Malvern*

A utilização de métodos de análise de tamanho de particulados finos tem tido crescente campo de utilização pelo aumento no uso de materiais em faixas granulométricas cada vez mais finas.

O equipamento usado foi o *Mastersizer DIF-2002 (Malvern)*. Esse método utiliza espalhamento (difração) da luz (*laser*). As partículas passam por um sensor óptico a *laser*. O sensor gera dados sem perturbar o sistema, que deve estar muito bem homogeneizado e disperso.

### 5.5.7 Área superficial específica - BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )

O método BET determina o total da área exposta do material particulado. À medida que se pulveriza o material, a área superficial aumenta. O método baseia-se no princípio de adsorção de gases em sólidos, em que o adsorvato é o gás e o adsorvente é o sólido ou substrato. O equipamento utilizado foi *Quantasorb 08-17*.

### 5.5.8 Índices de brancura e índice cromático

Para determinação dos índices de brancura, importante quando estão envolvidas questões relacionadas à pigmentação, incide-se um feixe de luz sobre uma amostra moída abaixo de 45  $\mu\text{m}$  e compactada sob a forma de pastilha, medindo-se sua reflexão, após passar alternadamente por três tipos de filtros: azul, verde e âmbar. Empregou-se o equipamento *Photovolt Natural (#325)*.

Com os resultados dos índices de brancura nos três filtros, é calculado o índice cromático (IC), representado pela seguinte relação:  $\text{IC} = (\text{âmbar} - \text{azul} / \text{verde}) * 100$ ; quanto mais baixo for este índice, melhor é a homogeneidade do item brancura.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Principais tipos de agalmatolito

Com os resultados dos trabalhos de campo e de laboratório, foram classificados os seguintes tipos de agalmatolitos de interesse industrial.

#### 6.1.1 Pirofilita-*fels* (*arnmha1*)

O pirofilita-*fels* (agalmatolito *roseki*, termo usado na mina) é de ocorrência restrita e encontra-se preferencialmente nas bordas e/ou envolvendo o pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (agalmatolito B1, termo usado na mina). Ele é caracterizado por sua coloração verde-claro a marrom, pela acentuada quantidade de quartzo e pelo baixo conteúdo de alumínio em relação aos outros agalmatolitos, o que pode ser fruto do zoneamento hidrotermal. Existem locais que sofreram os efeitos mais fortes da alteração, onde a sílica dissolvida nestes foi remobilizada e concentrada em locais afastados, de mais circulação de fluidos. Essa rocha é compacta e possui mais resistência mecânica, se comparada com as demais variedades de agalmatolito descritas a seguir, sendo composta de quartzo e pirofilita, de difícil distinção em afloramento, pois é facilmente confundida com quartzitos metassedimentares (FIG. 13).

Aparentemente, o pirofilita-*fels* não possui controle estrutural para sua prospecção e nenhum protólito específico. Essa rocha é denominada, pelos autores russos, de “quartzito secundário” (Romano 2006).



FIGURA 13 - Foto da amostra típica do pirofilita-fels (*roseki*).

#### 6.1.2 Pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (*arnmha2*)

O pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (agalmatolito B1, termo usado na mina) é compacto e caracteriza-se por sua textura sedosa, coloração que varia de verde esbranquiçado a marrom e pela enorme quantidade de cristais subédricos de cianita cujos tamanhos variam de centimétricos a milimétricos e estão concentrados em determinadas porções da rocha (FIG. 14).



FIGURA 14 - Foto da amostra típica do pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (B1).

### 6.1.3 Muscovita-pirofilita-agalmatolito (*armmha3*)

Geralmente encontrado associado ao pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (agalmatolito B1), o muscovita-pirofilita-agalmatolito (agalmatolito esverdeado, termo usado na mina) é facilmente confundido com ele. Tal rocha é compacta e caracteriza-se por sua coloração verde-escuro a levemente amarronzada (FIG. 15).



FIGURA 15 - Foto da amostra típica do muscovita-pirofilita-agalmatolito (esverdeado).

### 6.1.4 Quartzito-pirofilítico com cloritoide (*armmha4*)

Caracteriza-se o quartzito-pirofilítico com cloritoide (agalmatolito chumbinho, termo usado na mina) pela enorme quantidade de cristais diminutos de cloritoide já alterados em hidróxidos de ferro, o que lhe confere coloração marrom, dando-lhe aspecto pintalgado. Essa rocha possui granulação fina, encontra-se geralmente alterada e é composta de muscovita e/ou pirofilita, ambas microcristalinas, cloritoide e quartzo (FIG. 16).



FIGURA 16 - Foto da amostra típica do quartzito pirofilitico com cloritoide (chumbinho).

#### 6.1.5 Muscovita-xisto (*arnmha5*)

O muscovita-xisto (agalmatolito canjica, termo usado na mina) encontra-se geralmente intemperizado e possui feição extremamente peculiar. Ocorre em praticamente toda a Serra dos Ferreiras. Essa rocha contém porfiroblastos de plagioclásio e/ou feldspato (K) desenvolvidos ao longo de uma foliação milonítica pronunciada em uma matriz de coloração verde esbranquiçado, granulação fina e constituída por mica branca microcristalina: muscovita e/ou pirofilita (FIG. 17).

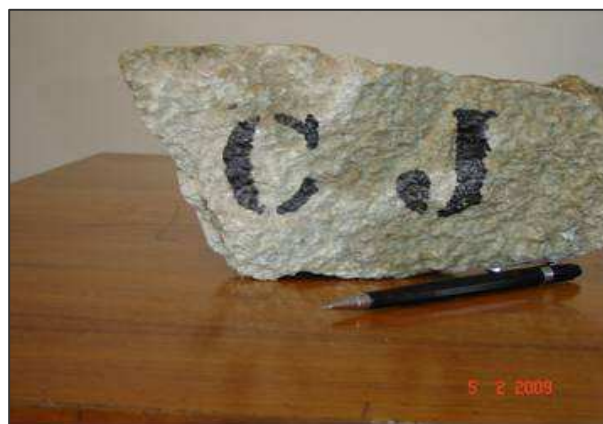


FIGURA 17 - Foto da amostra típica do muscovita xisto (canjica).

### 6.1.6 Muscovita-quartzo-agalmatolito (*arnmha6*)

O muscovita-quartzo-agalmatolito (agalmatolito micado, termo usado na mina) é uma rocha de coloração branco acinzentado, fortemente foliada, possui textura bastante fina, tornando difícil a identificação de sua mineralogia a olho nu. Sua principal ocorrência é na Frente Esperança, sobreposta ao muscovita-xisto, sendo relativamente restrita na Serra dos Ferreiras. Até o momento não tem aplicação industrial (FIG. 18).



FIGURA 18 - Foto da amostra típica do muscovita-quartzo-agalmatolito (micado).

## 6.2 Análises químicas

### 6.2.1 Análises químicas de diversos tipos de agalmatolito da Serra dos Ferreiras

A TAB. 1 mostra análises químicas dos agalmatolitos da Serra dos Ferreiras coletados em afloramentos e identificados seguindo-se numeração dos pontos de campo, totalizando 13 amostras.

TABELA 1  
Agalmatolitos da Serra dos Ferreiras

Identificação	PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>
S1 - 001	4,62	46,09	45,88	2,13	0,33	0,01	0,05	0,39	3,73	0,03	0,12	0,00
S1 - 037	4,49	46,93	38,92	2,38	0,75	0,03	0,14	2,12	8,36	0,00	0,23	0,03
S1 - 124	4,54	47,80	39,71	1,86	0,45	0,04	0,35	1,00	8,52	0,02	0,10	0,03
S1 - 63a	0,75	49,49	41,10	6,37	2,43	0,06	0,08	0,05	0,18	0,10	0,14	0,00
S1 - 092	4,26	54,87	35,97	1,62	0,27	0,02	0,12	0,60	6,39	0,03	0,13	0,00
S1 - 073	5,05	65,22	31,32	1,62	0,20	0,02	0,07	0,41	0,92	0,02	0,07	0,05
S1 - 043	5,02	65,33	31,26	1,18	0,32	0,02	0,06	0,21	1,45	0,02	0,19	0,02
S1 - 036	4,89	66,49	30,21	1,44	0,22	0,02	0,12	0,27	0,99	0,02	0,02	0,08
S1 - 34b	4,43	70,96	26,63	1,05	0,14	0,02	0,07	0,07	0,92	0,02	0,12	0,04
S1 - 41	2,40	72,95	17,93	1,36	1,84	0,04	0,39	0,12	5,24	0,03	0,18	0,02
S1 - 71	3,89	75,09	22,58	1,05	0,36	0,02	0,11	0,10	0,55	0,01	1,34	0,00
S1 - 62c	3,87	75,96	22,27	1,02	0,05	0,02	0,10	0,23	0,22	0,00	0,00	0,10
S1 - 62a	3,39	77,43	20,38	0,96	0,04	0,03	0,11	0,12	0,79	0,01	0,36	0,00

O GRAF. 2 mostra um *trend* positivo na correlação Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x TiO<sub>2</sub>. Os dois elementos são considerados imóveis durante as fases metamórficas e a alteração hidrotermal e possuem características físico-químicas semelhantes, bem como os ciclos geoquímicos.

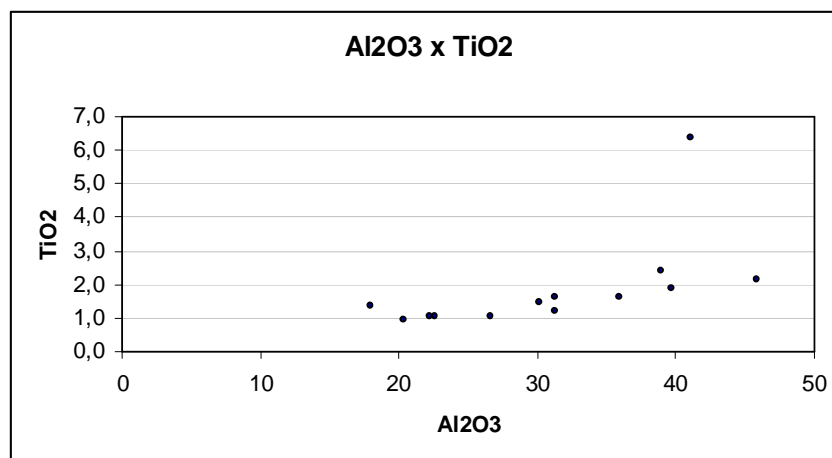


GRÁFICO 2 - Correlação Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x TiO<sub>2</sub>  
para os agalmatolitos da Serra dos Ferreiras.

### 6.2.2 Análises químicas dos tipos de agalmatolito selecionados para os ensaios tecnológicos

Os tipos de agalmatolito previamente selecionados entre os até então estudados são aqueles que, além de ocorrerem em maiores quantidades, apresentam teores mais baixos de minerais coloríficos. São eles: pirofilita-*fels* (agalmatolito *roseki*); pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (agalmatolito B1); muscovita-pirofilita-agalmatolito (agalmatolito esverdeado); muscovita-xisto (agalmatolito canjica) e muscovita-quartzo-agalmatolito (agalmatolito micado) e uma amostra do agalmatolito de Mateus Leme.

Os resultados da análise química da amostra de agalmatolito de Mateus Leme destacam-se entre os demais pelo alto teor em  $K_2O$  e baixos teores de  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  e  $Cr_2O_3$ , com valores similares aos agalmatolitos da região de Pará de Minas.

TABELA 2

Resultados das análises químicas dos tipos de agalmatolito em estudo

Análise química (%)	<i>Roseki</i>	B1	Esverdeado	Canjica	Micado	Mateus Leme
PF	3,20	6,36	7,33	2,69	2,83	4,60
SiO <sub>2</sub>	74,95	49,18	49,92	71,89	71,86	45,72
TiO <sub>2</sub>	1,01	1,96	2,04	0,95	0,95	0,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,80	40,63	37,11	19,03	19,11	37,76
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	0,24	0,15	0,06	0,06	0,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,65	0,56	0,41	0,42	0,26
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
MgO	0,11	0,13	0,23	0,19	0,20	0,10
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,19	0,22	0,34	0,36	0,37
K <sub>2</sub> O	0,61	0,57	2,35	4,37	4,16	10,73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02
ZrO <sub>2</sub>	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02

### 6.3 Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX)

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 de outros constituintes da amostra, por aumento do 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, consideram-se como limite prático as concentrações da ordem de 2 a 3% da fase cristalina (Garcia 2004).

As amostras caracterizadas apresentam diferenças em suas composições, porém os minerais pirofilita, muscovita e quartzo são os mais comuns. Um outro mineral muito comum nos agalmatolitos, geralmente recristalizado em cristais diminutos, é o rutilo, entretanto não foi detectado em todas as amostras, provavelmente devido aos baixos teores.

As caracterizações realizadas no CPMTC–UFMG podem ser vistas nos difratogramas das FIG. 19 a 24.

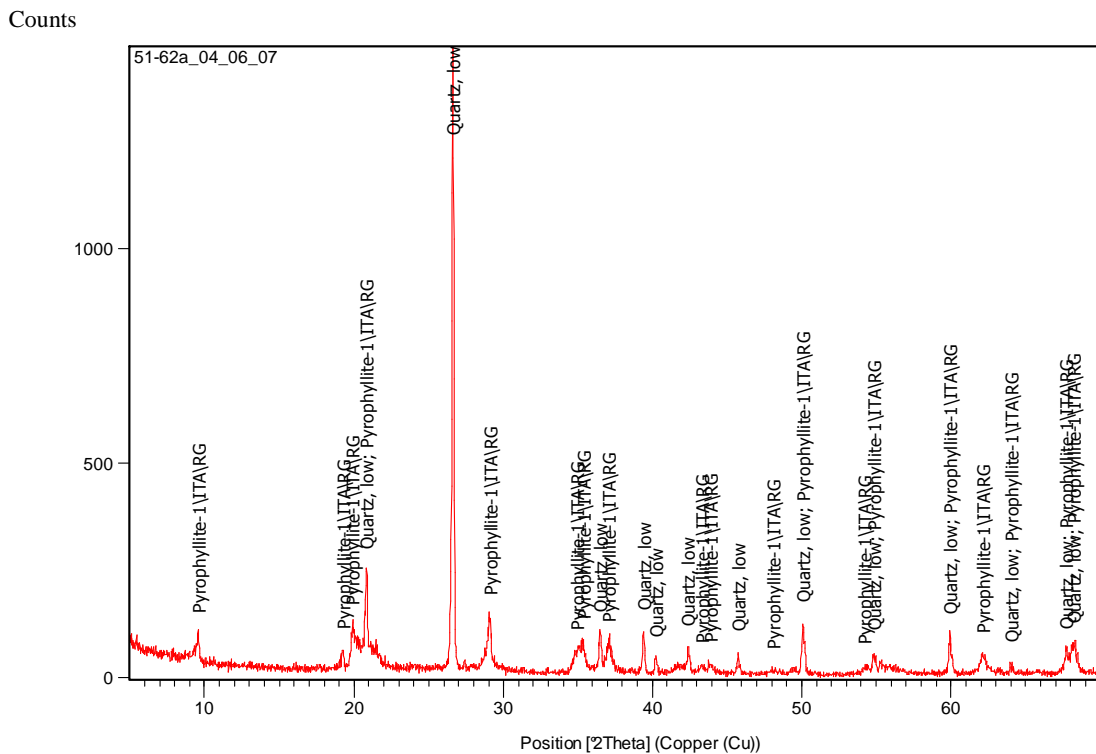


FIGURA 19 - Difratograma da amostra de agalmatolito *roseki*.



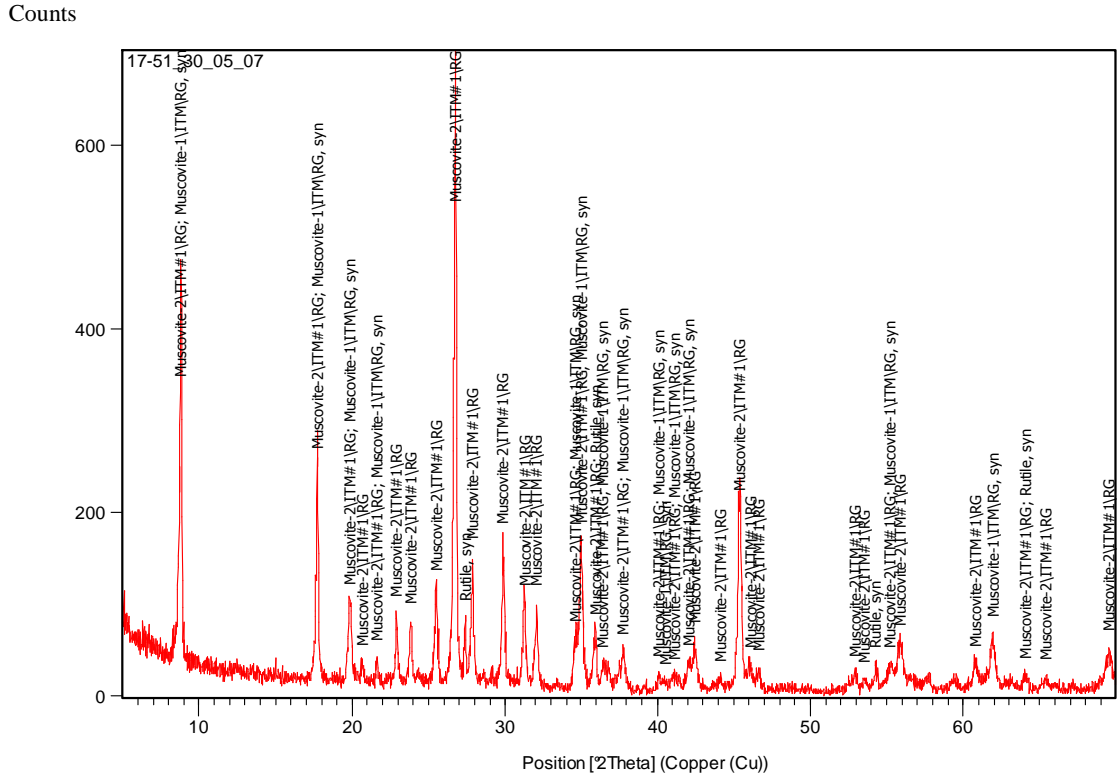


FIGURA 22 - Difratoograma da amostra de agalmatolito canjeite.

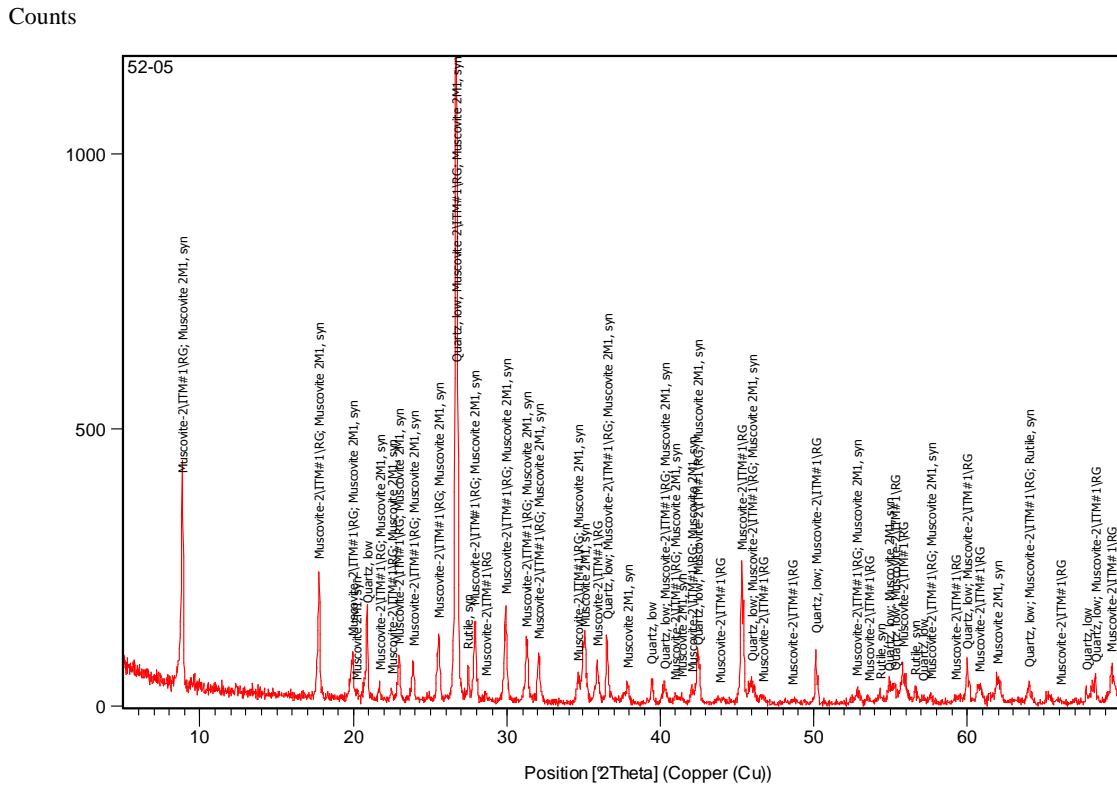


FIGURA 23 - Difratoograma da amostra de agalmatolito micado.

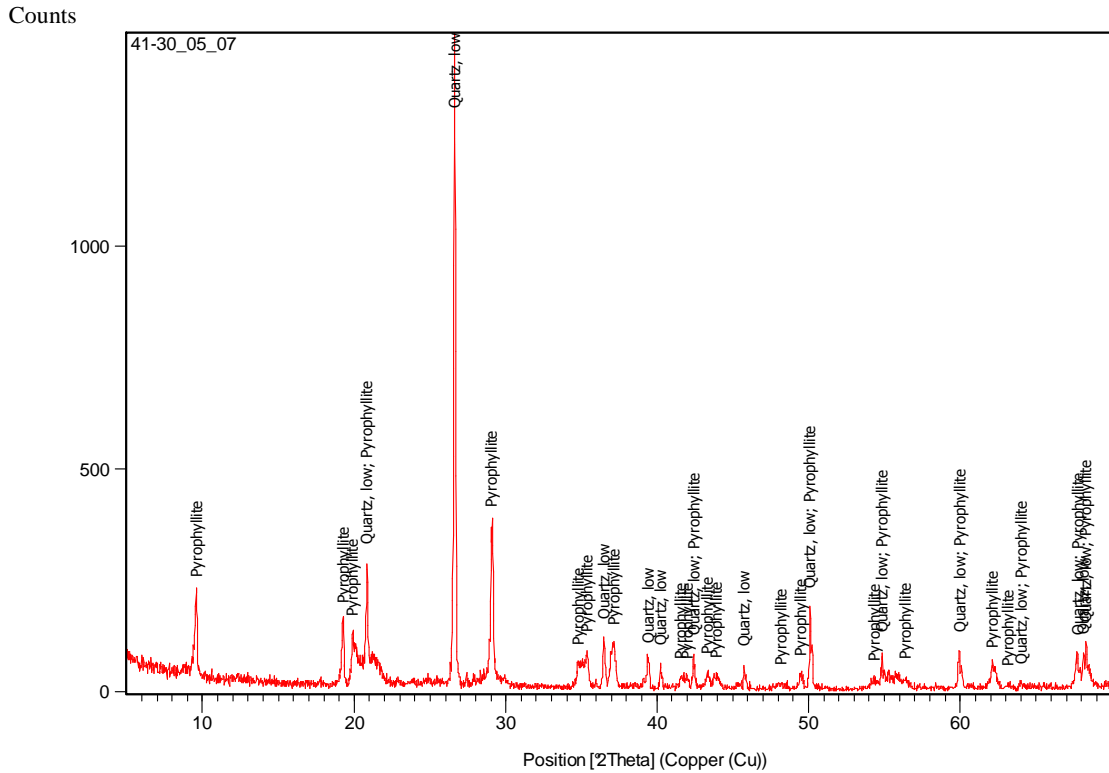


FIGURA 24 - Difratoograma da amostra de agalmatolito chumbinho.

A FIG. 25 ilustra o difratograma realizado no CPqD da Magnesita Refratários S.A. da amostra de agalmatolito de Mateus Leme. Trata-se de uma rocha constituída essencialmente de muscovita.

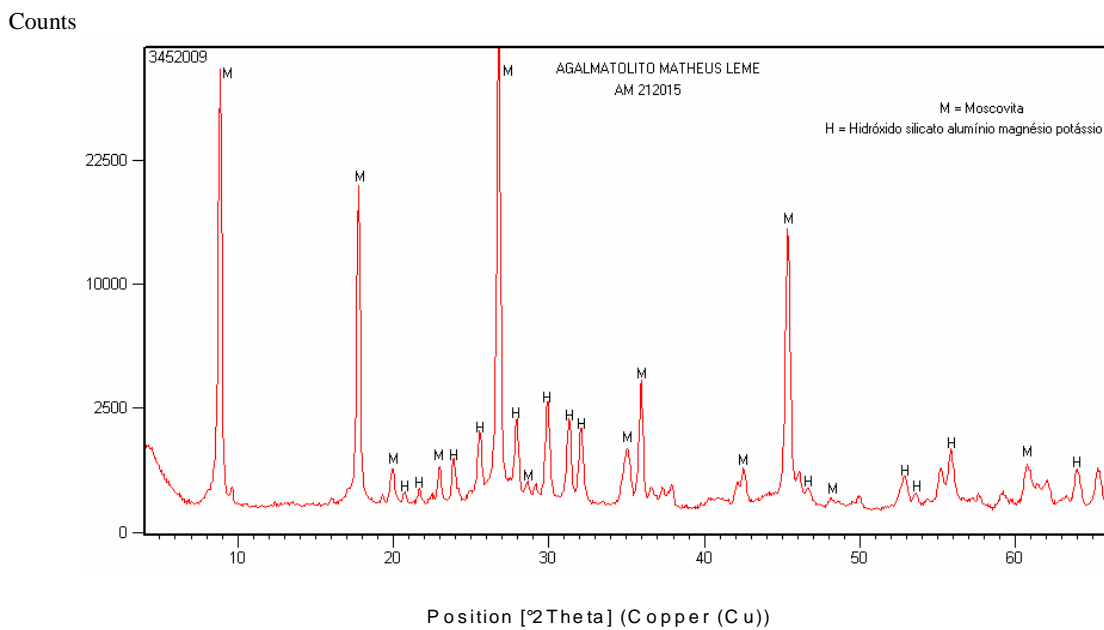


FIGURA 25 - Difratoograma da amostra de agalmatolito de Mateus Leme.

M= muscovita; H = hidróxido silicato alumínio magnésio potássio (variedade de muscovita).

#### 6.4 Massa específica

Os dados da massa específica para o agalmatolito, de acordo com os tipos, são apresentados na TAB. 3. Todos os tipos estudados atendem às especificações para a indústria de tintas, que são de  $2,80 \pm 0,20 \text{ g/cm}^3$  (Luz *et al.* 2001).

TABELA 3  
Massa específica dos tipos de agalmatolito estudados

Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	<i>Roseki</i>	<b>B1</b>	<b>Esverdeado</b>	<b>Canjica</b>	<b>Micado</b>	<b>Mateus Leme</b>
	2,75	2,97	2,87	2,77	2,77	2,85

#### 6.5 Análise granulométrica dos particulados - *Malvern*

Apresentam-se, a seguir, na TAB. 4, os resultados das determinações de tamanhos de partículas das amostras, após a moagem com 99,5% abaixo de  $45 \mu\text{m}$ .

TABELA 4  
Determinação de tamanho médio das partículas

Analizador <i>Malvern</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>Roseki</i>	<b>B1</b>	<b>Esverdeado</b>	<b>Canjica</b>	<b>Micado</b>	<b>Mateus Leme</b>
D <sub>10</sub>	1,26	1,37	1,95	1,89	2,05	3,99
D <sub>25</sub>	2,43	2,62	3,75	3,82	4,03	8,41
<b>D<sub>50</sub></b>	<b>5,94</b>	<b>5,48</b>	<b>7,84</b>	<b>7,79</b>	<b>7,86</b>	<b>17,89</b>
D <sub>75</sub>	14,65	12,12	17,01	15,00	14,58	29,23
D <sub>90</sub>	27,36	24,84	32,39	25,87	24,58	42,38
D <sub>98</sub>	48,07	47,14	54,21	44,88	42,65	60,16

sendo: D<sub>90</sub> = diâmetro no qual passam 90% da massa das partículas;  
D<sub>50</sub> = diâmetro no qual passam 50% da massa das partículas;  
D<sub>10</sub> = diâmetro no qual passam 10% da massa das partículas.

A partir dos resultados, é possível perceber que o agalmatolito de Mateus Leme apresenta um  $D_{50}$  (diâmetro no qual passam 50% da massa das partículas) igual a 17,89  $\mu\text{m}$ , indicando que sua granulometria é mais grossa que a dos outros agalmatolitos estudados. Apesar de ter sido moído na mesma granulometria dos outros, isto ocorre devido à sua composição mineralógica ser essencialmente composta de minerais lamelares, como a muscovita e a pirofilita, dificultando moagem mais eficaz.

As curvas de distribuição granulométrica mostram que, mesmo seguindo o procedimento na moagem, de acordo com o subitem 5.5.2, em que se procurou fazer uma moagem seletiva, ainda assim geraram-se superfinos. Na prática, para que isto não ocorra, é necessário o uso de um classificador no sistema de moagem, em que o material moído abaixo da granulometria específica vai sendo retirado do circuito de moagem.

A FIG. 26 mostra o histograma da distribuição da granulometria das partículas da amostra de agalmatolito de Mateus Leme moída abaixo de 45  $\mu\text{m}$ .

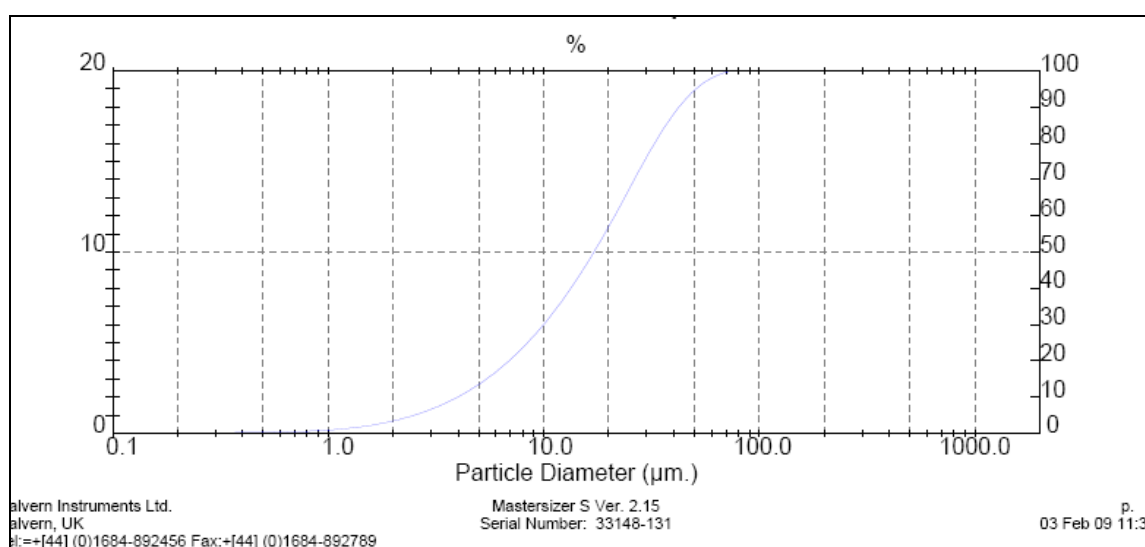


FIGURA 26 - Difratograma para a amostra de agalmatolito de Mateus Leme no analisador *Malvern*.

## 6.6 Área superficial específica - BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )

As medidas da área superficial específica encontram-se na TAB. 5.

TABELA 5  
Determinação de área superficial específica

Área superficial específica BET (m <sup>2</sup> /g)	<i>Roseki</i>	B1	Esverdeado	Canjica	Micado	Mateus Leme
	17,63	21,71	14,63	6,01	4,96	2,40

Os resultados mostram que a amostra de agalmatolito da região de Mateus Leme é a que apresenta a menor área superficial específica (2,40 m<sup>2</sup>/g), devido à presença mais marcante de minerais lamelares como a pirofilita e a muscovita. Para o uso em tintas, é fator essencial essa morfologia das partículas dos minerais dessas rochas, que contribui com aspectos relacionados à tixotropia da tinta, sua estabilidade e facilidade de dispersão. As amostras restantes apresentaram altos valores, destacando-se agalmatolitos refratários, B1 com 21,71 m<sup>2</sup>/g e *roseki* com 17,63 m<sup>2</sup>/g, consequência de suas composições mineralógicas.

### 6.7 Índices de brancura e índice cromático

Na TAB. 6 verificam-se os resultados dos índices de brancura e cromático.

TABELA 6  
Índices de brancura e cromático dos agalmatolitos

Brancura (*)	<i>Roseki</i>	B1	Esverdeado	Canjica	Micado	Mateus Leme
<b>Azul</b>	77,0	65,0	74,0	80,0	79,5	84,0
<b>Verde</b>	82,5	75,0	78,0	86,5	86,5	87,0
<b>Âmbar</b>	83,0	78,0	80,0	87,5	88,0	86,5
<b>Índice cromático</b>	7,27	17,33	7,69	8,67	9,83	2,87

(\*) o padrão de 100% é o dióxido de titânio.

Os valores de brancura dos agalmatolitos canjica e micado são os que mais se aproximam dos do agalmatolito de Mateus Leme, que atende às exigências do mercado de tintas, porém o índice cromático mais baixo foi o de Mateus Leme.

## 6.8 Caracterização de amostras de diversos produtos de agalmatolito

A Magnesita Refratários S.A. procedeu à caracterização de amostras de diversos produtos de agalmatolito da região de Pará de Minas, cujos resultados estão disponibilizados nas TAB. 7 a 9.

TABELA 7

Agalmatolito Lamil micro-ex

(coletado na PPG Indústria do Brasil – Tintas e Vernizes Ltda.)

Análise química (%)	Agalmatolito
Base calcinada	micro-ex (*)
PF	(4.04)
SiO <sub>2</sub>	49,85
TiO <sub>2</sub>	0,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42,12
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18
MnO	0,00
CaO	0,01
MgO	0,04
Na <sub>2</sub> O	0,29
K <sub>2</sub> O	6,61
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07
ZrO <sub>2</sub>	0,14
<b>DRX (fases mineralógicas)</b>	Muscovita Cianita Pirofilita
<b>Área superficial específica (BET) m<sup>2</sup>/g</b>	5,80
<b>Brancura (filtro verde)</b>	91,34
<b>Índice cromático</b>	2,91

(\*) usado como carga especial para substituir parcialmente TiO<sub>2</sub> e carbonato de cálcio precipitado em tintas imobiliárias, com participação de 2-3,5% em peso. O Micro Ex é também usado em formulações de *primer*, massas rápidas e sintéticas para repintura automotiva.

Fonte: Magnesita Refratários S.A. (2001).

TABELA 8

Agalmatolito Lamil 500 e 325 (coletado na Minérios Ouro Branco Ltda.)

<b>Análise química (%)</b>	<b>Agalmatolito</b>	<b>Agalmatolito</b>
<b>Base calcinada</b>	<b>500 (*)</b>	<b>325 (*)</b>
<b>PF</b>	(3,5)	(4,9)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	53,87	56,01
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,63	0,61
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	39,75	34,30
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,00	0,00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,16	0,24
<b>MnO</b>	0,00	0,00
<b>CaO</b>	0,05	0,76
<b>MgO</b>	0,25	0,28
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,20	0,29
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4,87	7,22
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,07	0,05
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,09	0,08
	Quartzo	Muscovita
<b>DRX (fases mineralógicas)</b>	Muscovita	Pirofilita
	Pirofilita	Cianita
	Cianita	
<b>Peso específico (g/m<sup>3</sup>)</b>	3,03	2,97
<b>Resíduo 45 µm (%)</b>	0,20	0,30
<b>Brancura (filtro verde)</b>	87,92	89,27
<b>Índice cromático</b>	2,93	3,26

(\*) usados como carga em tintas imobiliárias, com granulometrias de #325 e #500, com participação média de 11% em peso.

Fonte: Magnesita Refratários S.A. (2005).

TABELA 9

Agalmatolito Lamil 550 e 325 (coletado na Minérios Ouro Branco Ltda.)

<b>Análise química</b> (%)	<b>Agalmatolito</b> <b>OB-550(*)</b>	<b>Agalmatolito</b> <b>OB-325(*)</b>
<b>PF</b>	(4.20)	(3.00)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	57,52	64,58
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,35	0,29
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	36,46	30,12
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,01	0,01
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,2	0,23
<b>MnO</b>	0,01	0,01
<b>CaO</b>	0,03	0,04
<b>MgO</b>	0,06	0,08
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,26	0,27
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4,96	4,31
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,05	0,02
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,11	0,06
<b>Área superficial (BET) m<sup>2</sup>/g</b>	6,78	3,74
<b>Peso específico (g/m<sup>3</sup>)</b>	3,019	2,957
<b>Resíduo 45 µm (%)</b>	0	0,1
<b>Brancura (filtro verde)</b>	91,92	88,56
<b>Índice cromático</b>	2,8	4,07

(\*) usados principalmente em tintas

Fonte: Magnesita Refratários S.A. (2001).

### 6.9 Principais especificações para refratários sílico-aluminosos

Refratários sílico-aluminosos são produtos constituídos essencialmente de óxidos de alumínio e sílica cujos teores variam entre 15 e 46%. São fabricados a partir de diversas matérias-primas minerais, tais como argilas diversas, caulim, cianita e agalmatolito e têm emprego principalmente em fornos de aquecimento para laminações e forjaria, altos-fornos, painéis de aço, chaminés, fornos para indústria cerâmica, fornos para cimento, para vidro e caldeiras, entre outros.

TABELA 10

Principais especificações dos agalmatolitos para refratários sílico-aluminosos

Tipo	Parâmetros químicos (%) base calcinada						Parâmetros físicos			Mineralogia
	(PF)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	Tamanho (mm)	Peso específico (g/m <sup>3</sup> )	CPE*	DRX
<i>Roseki</i>	>5	<72	>1,3	>26	>0,5	>0,7	>250	<2,6	-	quartzo/pirofilita
B1	-	49/5 3	>2,6	42/46	>0,6	>2,5	>250	-	33 (1.743 C)	pirofilita, diásporo, muscovita, caulinita, rutilo
Esverdeado	-	50/5 2	>2,5	39/43	>1,0	3,5/4,5	>30	-	33 (1.743 C)	pirofilita, diásporo, muscovita, cianita, rutilo
Canjica	>3	76/8 0	>1,0	16/18	>0,2	1,7/3,5	>4	2,6/2,7	28 (1.646° C)	quartzo/pirofilita/muscovita
Chumbinho	>5	72/7 6	0,8/ 1,2	21/25	0,3/0,7	0,1/0,4	>40	2,5/2,6	28 (1.646° C)	quartzo/pirofilita/caulinita

(\*) CPE: refratariedade ou cone pirométrico equivalente ou superior a

Fonte: Magnesita Refratários S.A. (1999).

### 6.10 Principais especificações para cargas minerais

Apesar da inexistência de padronização oficial para as especificações das cargas minerais em função da aplicação a que se destinam, as exigências dos consumidores junto aos seus fornecedores dependem de formulações próprias. A partir da literatura, de informações técnicas de representantes comerciais, de pesquisadores, etc., foi elaborado o QUADRO 5 com as principais especificações básicas.

**QUADRO 5**  
Principais especificações para cargas minerais

Usos	Tamanho (µm)	Brancura (*)	Índice cromático	Morfologia/especificações químicas	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção em óleo (g de óleo/100g)	Área superficial específica BET (m <sup>2</sup> /g)	Perda ao fogo (% Max.)
Tintas (pigmentos)	99,5%<45	> 90	3%<	partículas lamelares	2,80 ± 0,20	37 a 43	5,3	1
Tintas (espalhador)	99,5%<45	> 88	3%<	partículas lamelares	2,80 ± 0,20	30 a 40	-	7
Cerâmica e colorificios	97%<45	>80	-	K <sub>2</sub> O>9%	2,80 ± 0,20	-	-	7
Borracha	99%<45	>80	-	-	-	-	3%<	3
Plástico (carga e reforço)	97%<45	> 77	-	-	-	-	1%<	1
Sabão	99%<45	-	-	-	-	-	1%<	3

(\*) O padrão de brancura 100% é o dióxido de titânio.

Fonte: Lobato (2005) e Luz *et al.* (2001).

### 6.11 Resumo dos resultados dos ensaios tecnológicos

Dos tipos de agalmatolito estudados, de acordo com o QUADRO 6, os que apresentaram melhores resultados quando comparados com o agalmatolito de Mateus Leme foram os agalmatolitos micado e o canjica.

## QUADRO 6

## Resumo dos resultados dos ensaios tecnológicos

Análise química (base calcinada)	Roseki	Esverdeado	B1	Micado	Canjica	Mateus Leme
(PF)	3,20	7,33	6,36	2,83	2,69	4,60
SiO <sub>2</sub>	77,43	53,87	52,52	73,95	73,88	47,92
TiO <sub>2</sub>	1,04	2,20	2,09	0,98	0,98	0,42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,39	40,04	43,39	19,67	19,56	39,58
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	0,17	0,26	0,06	0,06	0,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,60	0,69	0,43	0,43	0,27
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
MgO	0,12	0,25	0,14	0,21	0,20	0,11
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,24	0,20	0,37	0,35	0,39
K <sub>2</sub> O	2,70	2,54	0,61	4,28	4,49	11,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02
ZrO <sub>2</sub>	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02
<b>Brancura</b>						
Azul	77,0	74,0	65,0	79,5	80,0	84,0
<b>Verde</b>	<b>82,5</b>	<b>78,0</b>	<b>75,0</b>	<b>86,5</b>	<b>86,5</b>	<b>87,0</b>
Âmbar	83,0	80,0	78,0	88,0	87,5	86,5
<b>Índice Cromático</b>	<b>7,27</b>	<b>7,69</b>	<b>17,33</b>	<b>9,83</b>	<b>8,67</b>	<b>2,87</b>
Mineralogia (fases mineralógicas)	quartzo	pirofilita	pirofilita	quartzo	quartzo	muscovita
	muscovita	caulinita	caulinita	muscovita	muscovita	
	pirofilita	muscovita	muscovita	pirofilita	pirofilita	
	coríndon	diásporo	diásporo			
Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> )	2,75	2,87	2,97	2,77	2,77	2,85
Área sup. Esp. BET (m <sup>2</sup> /g)	17,63	14,63	21,71	4,96	6,01	2,40
<b>Analizador Malvern (µm) determinações do tamanho médio das partículas</b>						
D <sub>10</sub>	1,26	1,95	1,37	2,05	1,89	3,99
D <sub>25</sub>	2,43	3,75	2,62	4,03	3,82	8,41
<b>D<sub>50</sub></b>	<b>5,94</b>	<b>7,84</b>	<b>5,48</b>	<b>7,86</b>	<b>7,79</b>	<b>17,89</b>
D <sub>75</sub>	14,65	17,01	12,12	14,58	15,00	29,23
D <sub>90</sub>	27,36	32,39	24,84	24,58	25,87	42,38
D <sub>98</sub>	48,07	54,21	47,14	42,65	44,88	60,16

## 6.12 Avaliações dos recursos geológicos

Como os corpos de agalmatolito de interesse ocorrem sob a forma de bolsões ou massas irregulares de pequenas dimensões (1 a 3 metros) entremeados nos outros tipos litológicos,

tornou-se impraticável sua delimitação exata. Daí a opção pela definição de áreas de maior representatividade dos tipos litológicos de interesse para a avaliação de reservas geológicas.

Em função dos afloramentos e dos resultados da sondagem, foram selecionados três locais, denominados Frente Esperança, Frente Lamelar I e Frente Lamelar II, onde foram executadas seções equidistantes de 30 metros, aproximadamente, normais à orientação preferencial do pacote.

Para o cálculo do volume, determinou-se, a partir dos resultados da sondagem, o percentual médio da distribuição relativa dos tipos de interesse nos locais selecionados. Em função destes dados, estimaram-se as reservas geológicas, considerando-se a densidade média de 2,80 t/m<sup>3</sup> (TAB. 11).

TABELA 11

Resumo dos recursos geológicos dos tipos estudados

Recursos (toneladas)	Agalmatolitos					
	<i>Roseki</i>	B1	Esverdeado	Chumbinho	Canjica	Micado
	150.000	350.000	400.000	350.000	400.000	50.000

## 7 CONCLUSÕES

As referências bibliográficas indicam que os agalmatolitos da Serra dos Ferreiras pertencem ao Grupo Nova Lima do Supergrupo Rio das Velhas. E o modelo atual estabelecido para a sua gênese é o de alteração hidrotermal ao longo de uma zona de cisalhamento (Romano 2006). Nesse modelo, a alteração hidrotermal funciona como no modelo clássico, sendo possível reconhecer zonas de predominância mineralógica, tais como: a) zona peraluminosa - presença de coríndon, polimorfos  $Al_2SiO_5$ , muscovita e minerais retrógrados, tais como diásporo, pirofilita e caulinita; b) zona muscovítica - muscovita e quartzo, com pirofilita e caulinita subordinadas.

Além desses minerais, ocorrem, associadas, quantidades variáveis de cloritoide, turmalina e rutilo.

Na área em estudo, foram identificados os seguintes tipos de rochas:

- Agalmatolitos, que são as rochas de interesse econômico encontradas nos mais variados tipos mineralógicos, químicos e físicos e, após desenvolvimentos tecnológicos, poderão ter as mais diversas aplicações industriais, além da indústria de refratários;
- metatufos, normalmente intemperizados, que representam a rocha encaixante da mineralização;
- quartzitos hidrotermais, intercalados entre as rochas peraluminosas e os metatufos intemperizados.

Os tipos litológicos caracterizados são descontínuos e apresentam contato abrupto, marcado por superfícies de cisalhamento. Os corpos possuem geometria em *boudin*, com espessuras e comprimentos bastante variados. Em afloramento, podem ser verificadas gradações texturais desde maciços até xistosos. As rochas xistosas possuem coloração verde-claro a cinza, textura fanerítica fina e forte anisotropia. As rochas compactas apresentam-se com coloração verde-acinzentado e com estrutura maciça.

Os agalmatolitos distribuem-se, preferencialmente, na porção centro-leste da Serra dos

Ferreiras. De maneira geral, predomina a variedade xistoso-compacta (agalmatolito lamelar) que, no nível atual de exposição, encontra-se intempericamente bastante alterada. Os agalmatolitos de interesse atual são verificados no meio do lamelar em incidências mais restritas.

É interessante comentar que, em visitas técnicas, com base em informações de profissionais que atuam nesse segmento e tendo em vista a literatura consultada (Reis *et al.* 2001), constatou-se que as frentes de lavra da maioria das minas em exploração na região de Pará de Minas e Mateus Leme acham-se estranguladas, comprometendo suas reservas em longo prazo. Essa situação é devida à lavra muito seletiva com a produção de apenas o tipo de agalmatolito *in natura* que atende às exigências da indústria, sendo o restante descartado. Os agalmatolitos da região de Pitangui e Onça de Pitangui, apesar de atualmente ainda não terem sido estudados em detalhes para cargas minerais, são os que apresentam recursos geológicos suficientes para o desenvolvimento de novos empreendimentos ou para substituir os já existentes.

A principal contribuição seria apresentar alternativas de uso para materiais estocados há longo tempo nos pátios das minas, o que contribuiria significativamente para o emprego de mão-de-obra local e minimização do impacto ambiental e tornaria os empreendimentos industriais viáveis e ambientalmente sustentáveis.

## **8 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **8.1 Trabalhos geológicos**

- Mapeamento de detalhe do restante dos depósitos de agalmatolito na região de Onça de Pitangui e Pitangui, estudo mineralógico e químico dos diversos tipos presentes e levantamento dos recursos geológicos;
- levantamento, amostragem e caracterização tecnológica dos estoques disponíveis em toda a região produtora.

### **8.2 Ensaio tecnológicos**

- Novos estudos tecnológicos visando evidenciar outros parâmetros, além da brancura, para os tipos aqui avaliados e também a realização de testes de flotação, branqueamento químico e micronização;
- será bastante interessante realizar convênios com Universidades e fabricantes para a elaboração de tintas com adições do agalmatolito da Serra dos Ferreiras para avaliar, entre outras, as propriedades dessas cargas e o impacto nas propriedades das tintas;
- estudar esses tipos como cargas minerais para outras aplicações industriais, tais como: plásticos, borrachas, vidros e fertilizantes, entre outros, que são também produtos de alto consumo social.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton de São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7: 349-364, 1977.
- ARAÚJO, G.H.L. *et al.* **Mapeamento geológico da região de Onça de Pitangui–MG. (escala 1: 10.000)**. Trabalho geológico de graduação. IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2007. 140 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma Brasileira nº. 10.239 de abril de 1996. **Classificação dos refratários sílico aluminosos**, 1996.
- BARTHOLI, J.C. **Guia prático sobre cargas minerais e suas aplicações em tintas**. Tintas e Vernizes, ago/set, 1998.
- BATES, R.L.; JACKSON, J.A. **Glossary of Geology American Geological Institute**. Alexandria, Virginia. USA. 2. ed., 1987. 788 p.
- BRANCO, J.J.R.; COSTA, M.T. Roteiro para a excursão Belo Horizonte - Brasília. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 14, Belo Horizonte, 1961. **Roteiro das excursões**, p. 6-10, 1961.
- BRISTOW, C.M. Society's changing requirements for primary raw materials. **Industrial Minerals**, n. 233: p. 59-65, 1987.
- CARMO, J.C.C.; ROMANO, A.W. O agalmatolito de Minas Gerais e sua utilização como rocha industrial. **Revista da Escola de Minas**, v. 49, n. 4: p. 39-44, 1996.
- CASTRO, C.D.; PETTER, C.O. Caracterização de cargas minerais para uso na indústria de tintas. *In: Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa*. Florianópolis–SC, v. 1: p. 745-751, 2004.
- CHAVES, A.O. **Enxames de diques máficos proterozoicos da porção meridional do Cráton do São Francisco (MG, Brasil)**. Dissertação de Mestrado, IGC/UFMG. 1996. 101 p.
- CIMINELLI, R.R. **Minerais industriais: a geologia com o foco no mercado**. Principais depósitos minerais no Brasil – DNPM, 2001.
- CORNISH, B.E. Australian pyrophyllite and its growing influence in world markets. 4th “**Industrial Minerals**” **International Congress**, Atlanta, 1998.
- DARDENNE, M.A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil central. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 30. **Anais...** Recife, SBG, v. 2: p. 597-610, 1978.
- DORR II, J. *et al.* **Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero**. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. Avulso 81, 1957, 31 p.

DORR II, J. **Physiographic, stratigraphic and structural development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** USGS. Prof. Paper, 641-A, 110 pp, Washington, 1969.

FUJII, N. **Pyrophyllite in Australia and the Far East.** Industrial Minerals November 1983, p. 21-27.

GARCIA, L.R.A. **Caracterização mineralógica dos minérios de magnesita do conjunto mineiro Pedra Preta – Jatobá – Pomba (Serra das Éguas, Brumado, BA).** Tese de Doutorado. EE/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004. 140 p.

GOMES, O.F.M. **Microscopia co-localizada: novas possibilidades na caracterização de minérios.** Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 130 p.

HARBEN, P.W. **Pyrophyllite:** The industrial minerals. Hand Book, v. II: p. 143-145, 1995.

HARBEN, P.W. **Pyrophyllite:** The industrial minerals. Hand Book, v. IV: p. 278-280, 2002.

HEINECK, C.A. **Geologia e mineralizações do Greenstone Belt Rio das Velhas na região de Mateus Leme, Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado. IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 1997, 154 p.

KING, L.C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 18, n. 2: p. 265, 1957.

LADEIRA, E.A. Primeiras lavas com almofadas (*pillows*) encontradas no Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, no Quadrilátero Ferrífero e no Distrito de Pitangui, Minas Gerais. **Ciências da Terra**, v. 1: p.12-14, 1981.

LARA FILHO, J. Geologia do talco e pirofilita. *In*: SCHOBENHAUS, C. *et al.* (eds.) **Principais depósitos minerais do Brasil.** Minerais industriais, Brasília, DNPM/CPRM, parte C, v. 4, cap. 47: p. 592-543, 1997.

LEINZ, V. Petrografia e gênese dos agalmatolitos de Minas Gerais. **Revista Mineira de Metalurgia**, p. 82-84, jul/ago, 1938.

LOBATO, E. **Minerais industriais: uma mina de oportunidades.** Exposibram - 2007. Disponível em: ([www.ibram.org.br/sites/700/784/00000938.pdf](http://www.ibram.org.br/sites/700/784/00000938.pdf)). Acesso em maio 2009.

LOBATO, E. **Panorama do mercado nacional de agalmatolito.** Relatório interno da Magnesita Refratários S.A., 2005.

LOCZY, L.; LADEIRA, E.A. **Geologia estrutural e introdução à geotectônica.** São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1976. 528 p.

LUZ, A.B. *et al.* Agalmatoliti – Lamil. *In*: **Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil.** SAMPAIO, J.A.; LUZ, A.B.; LINS, F.F. (eds). Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 202-210, 2001.

- MAGNESITA REFRAATÁRIOS S.A. **Documentos internos**, 1999.
- MAGNESITA REFRAATÁRIOS S.A. **Documentos internos**, 2001.
- MAGNESITA REFRAATÁRIOS S.A. **Documentos internos**, 2005.
- MENEZES FILHO, R.R.; MATTOS, G.M.M.; FERRARI, P.G. **Projeto Três Marias**. Convênio DNPM-CPRM. Belo Horizonte, Relatório Final, 1977. 339 p.
- MORAES, L.J. Jazidas de agalmatolitos em Minas Gerais. **Revista Mineira de Metalurgia**, p. 89-99, jul/ago, 1938.
- MOREIRA, M.D. **Aplicações dos minerais e rochas industriais**. SBG Núcleo BA-SE, 1994. 88 p.
- NABETANI, A.; SHIKAZONO, N. Chemical process and environment of hydrothermal alteration of acidic volcanic in the Mitsuishi district, southwest Japan. **Geochemical Journal**, v. 36: pp. 255–269, 2002.
- NOGUEIRA, H.; BARZAGHI, L. Composição mineralógica do agalmatolito de Pará de Minas. **Cerâmica**, XVIII, n. 71: p. 371-380, 1972.
- OLIVEIRA, E.A. **Geologia, petrografia e geoquímica do Maciço Granitoide de Cachoeira da Prata**. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte: IGC/UFMG, 1999. 82 p.
- PAIVA, C.T. **Geologia da porção sudeste do lineamento Pitangui-Cráton do São Francisco Meridional-MG**. Trabalho de Geólogo de Graduação, Belo Horizonte: IGC/UFMG, 1996. 30 p.
- PEREZ, B.C. **As rochas e os minerais industriais como elemento de desenvolvimento sustentável**. Série Rochas e Minerais Industriais, CETEM, 2001. 37 p.
- PEREZ, F. *et al.* Agalmatolito como um novo fundente para a indústria cerâmica. *In*: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. **Anais...**, Florianópolis-SC, p. 44701-44711, 1999.
- PERILLO, M. *et al.* Contacto entre o Maciço Granitoide de Florestal (MGF) e o Supergrupo Rio das Velhas (SGRV). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40. **Anais...** Belo Horizonte, SBG, v. 1: p. 54, 1998.
- REIS, E. *et al.* **Levantamento da situação e das carências tecnológicas dos minerais industriais brasileiros**. Ministério de Ciência e Tecnologia, p. 1- 55, 2001.
- RENGER, F.E. *et al.* Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, v. 2, n. 1: p. 1-11, 1994.
- RICHTER, P.; LACERDA, G.M. **Relatório de reconhecimento geológico-geoquímico: Pitangui-Papagaios-Pequi, Minas Gerais**. Convênio Geofísica Brasil-Alemanha – CGBA (DNPM-BGR-CPRM), Belo Horizonte, 1975. 96 p.

ROMANO, A.W. Alteração metassomática pré-metamórfica na origem das rochas peraluminosas do supergrupo Rio das Velhas nos distritos de Pitangui e Mateus Leme, Minas Gerais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 36. **Resumos e breves comunicações**, Natal, SBG, 1990. 211 p.

ROMANO, A.W.; CARMO, J.C.C. Litoestratigrafia e alteração hidrotermal das rochas do supergrupo Rio das Velhas no sinclínório de Pitangui-Pequi, Minas Gerais: **Revista da Escola de Minas**, v. 45, n. 1 e 2: p. 115-117, 1992.

ROMANO, A.W. Evolution tectonique de la région nord-ouest du Quadrilatère Ferrifère - Minas Gerais-Brésil. (Thèse Doctorat CRPG-CNRS/Université de Nancy I, Vandoeuvre-lès-Nancy, France), 1989. 259 p.

ROMANO, A.W.; NOCE, C.M. Feições estruturais do Lineamento Pitangui-Congonhas. *In: SNET 5. Anais...*, Gramado, SBG: p. 76-77, 1995.

ROMANO, A.W. O Supergrupo Rio das Velhas da Faixa Mateus Leme Pitangui – parte meridional do Cráton de São Francisco, MG – e seu sistema de alteração hidrotermal. **Geonomos**, v. 1, n. 1: p. 16-32, 1993a.

ROMANO, A.W. **Rochas peraluminosas (agalmatolitos) da Fazenda Terra do Feijão - Pará de Minas**. Lamil – Lage Minérios, Relatório Interno, Pará de Minas-MG, 1993b. 67 p.

ROMANO, A.W.; PAIVA, C.T. Evolução de eventos tectônicos, metamórficos e de alteração hidrotermal ao longo de uma zona de cisalhamento; exemplo do Lineamento Pitangui, parte meridional do Cráton do São Francisco, MG. *In: SNET 6. Anais...* Pirenópolis, SBG: p. 21-22, 1997.

ROMANO, A.W. **Programa Geologia do Brasil**: contrato CPRM 059/PR/05 – UFMG, Folha Pará de Minas 1:100.000 SE-23-Z-C-IV, Relatório Final. 2006. 70 p.

TEIXEIRA, N.A.; AITA, L. Contexto geológico das ocorrências de pirofilita entre Pitangui-Mateus Leme-MG. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 34. **Anais...**, Goiânia, SBG (B. SBG, resumos e breves Comunicações), p. 97-98, 1986.

TEIXEIRA, N.A.; KUYUMJIAN, R.M. The Mateus Leme-Pitangui hydrothermal zone: Do they represent a fossil hot spring system in the Rio das Velhas greenstone belt, Central Brazil. *In: LADEIRA, E.A. (ed). Brazil Gold'91*. Rotterdam, Balkema, p. 579- 583, 1991.

TOGASHI, Y. Mineral production and the economic growth of Thailand. *In: Proceedings of a National Conference on the Geological Resources of Thailand*. Potential for Future Development. PRIANCHAROEN, C. (editor in-chief). Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, p. 16-23, 1992.

UYGUN, A.; SOLAKOGLU, E. Geology and origin of the pyrophyllite: deposits in the puturge massif (Malatya – Eastern Turkey). Turkey: **Bulletin of the Mineral Research and Exploration**, p. 13-19, 2002.

## APÊNDICES E ANEXOS

### APÊNDICE A - DESCRIÇÕES MACROSCÓPICA E MICROSCÓPICA

#### A. Pirofilita-*fels* (agalmatolito *roseki*)

##### Descrição macroscópica

Rocha maciça bastante resistente, de granulação fina, coloração verde acastanhado, composta de quartzo e pirofilita. A amostra encontra-se com uma fina capa de alteração.



FIGURA 27 - Foto da amostra de pirofilita-*fels*.

##### Descrição microscópica

Rocha constituída por uma matriz de agregados finos de pirofilita. Os fenocristais de quartzo imersos na matriz encontram-se recristalizados, por vezes estirados, apresentando formas bizarras, com extinção ondulante, formando caudas de recristalização do tipo &. Alguns cristais exibem alteração mimerquítica, sendo o contato entre os mesmos em geral poligonizados. É importante salientar que a “matriz” não possui orientação, enquanto que os cristais de quartzo estão orientados. Como minerais acessórios, têm-se: rutilo - em cristais milimétricos em geral subédricos, sendo que alguns cristais apresentam-se geminados; zircão - em cristais diminutos euédricos apresentando leve zoneamento de verde a acastanhado; clorita - em palhetas com fraco pleocroísmo de branco a verde-claro, raramente encontrados.



FIGURA 28 - Microfotografias dos fenocristais de quartzo imersos em matriz pirofílica.

Nicois paralelos à esquerda e cruzados à direita 2,5 X, luz transmitida.

## **B. Pirofilita-muscovita-cianita-diasporito (agalmatolito B1)**

### **Descrição macroscópica**

Rocha maciça, de granulação fina, coloração esverdeada, composta de cianita, facilmente reconhecida, muscovita, pirofilita e rutilo.



FIGURA 29 - Foto da amostra de pirofilita-cianita-diásporo.

### **Descrição microscópica**

Rocha caracterizada por uma matriz quase que inteiramente formada por cristais aciculares de cianita alterados para diásporo e pirofilita. As finas palhetas de pirofilita e muscovita e os cristais diminutos de diásporo em forma de bastonetes ocorrem preferencialmente sob a forma de pseudomorfos, substituindo antigos cristais de cianita. Subordinadamente estão presentes cristais diminutos de rutilo, hidróxido de ferro e raros cristais de zircão parcialmente zonados.

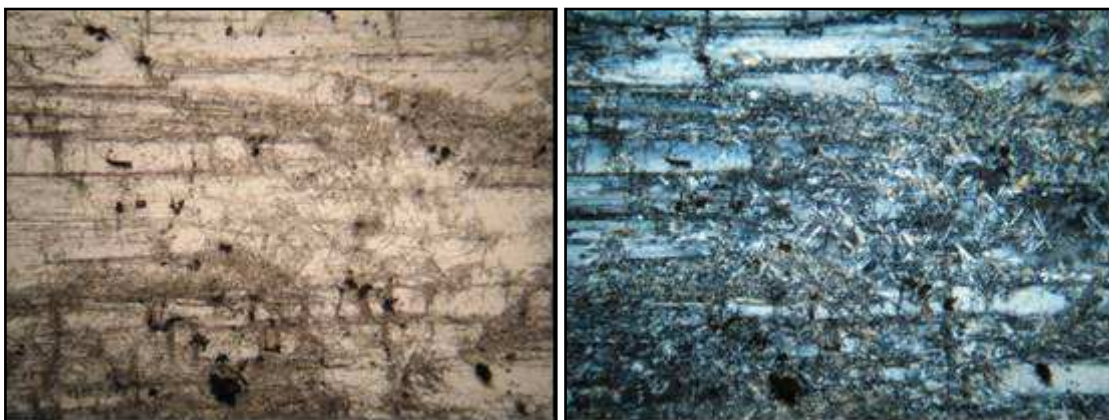


FIGURA 30 - Microfotografias, reação de reequilíbrio cianita  $\rightarrow$  pirofilita + diásporo. Nicois paralelos (à esquerda) e nicois cruzados (à direita), 2,5 X, luz transmitida.

### **C. Muscovita-pirofilita-agalmatolito (agalmatolito esverdeado)**

#### **Descrição macroscópica**

Rocha maciça, com granulação fina, textura sedosa, coloração verde, composta de muscovita, pirofilita e rutilo.



FIGURA 31 - Foto da amostra de muscovita-pirofilita-agalmatolito.

#### **Descrição microscópica**

Rocha constituída por “massa” de agregados finos de clorita, muscovita e pirofilita contendo restos de cristais anédricos e diminutos de rutilo, cristais subédricos de cloritoide predominantemente alterados para hidróxido de ferro.

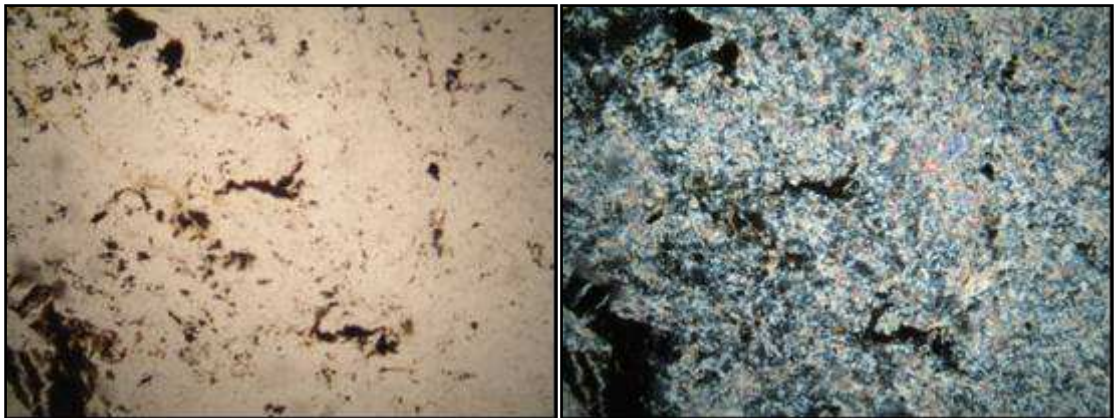


FIGURA 32 - Microfotografias: “massa” de agregados finos de clorita, muscovita e pirofilita com cristais diminutos de rutilo disseminados.

Nicois paralelos (à esquerda) e nicois cruzados (à direita), 2,5 X, luz transmitida.

#### **D. Quartzito-pirofilítico com cloritoide (agalmatolito chumbinho)**

##### **Descrição macroscópica**

Rocha maciça com granulação fina, textura sedosa, coloração verde, composta de muscovita, pirofilita e rutilo.



FIGURA 33 - Foto da amostra de quartzito-pirofilítico com cloritoide.

##### **Descrição microscópica**

Rocha composta de uma matriz de agregado fina de pirofilita. Imersos nessa “matriz” têm-se fenocristais de quartzo recristalizados desenvolvidos ao longo da foliação marcada pelas finas palhetas de muscovita e/ou pirofilita e cristais euédricos de cloritoide parcialmente alterados para óxido de ferro. Em geral, os pórfiros de quartzo apresentam extinção ondulante, formando raramente caudas de recristalização do tipo  $\delta$ . Subordinadamente, têm-se finos cristais anédricos de clorita orientados.

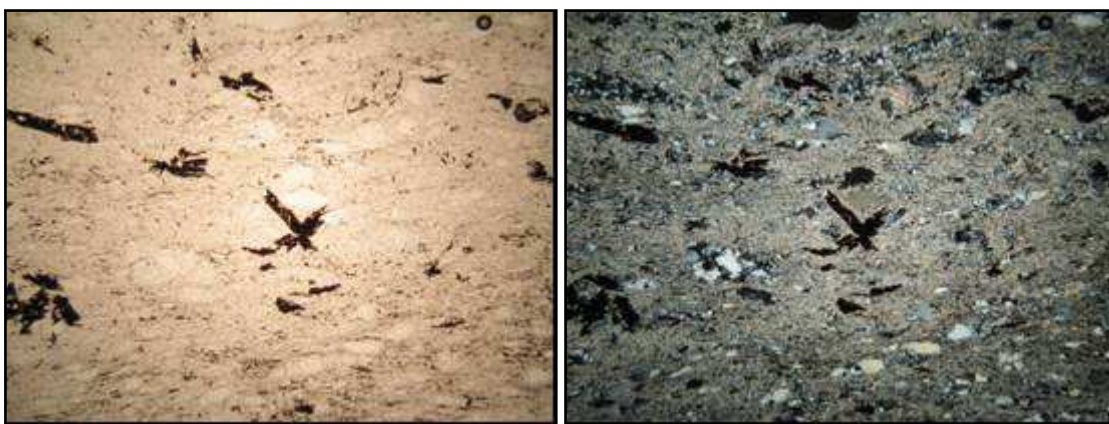


FIGURA 34 - Microfotografias: fenocristais de quartzo e cristais de cloritoide imersos em “matriz” pirofilítica.

Nicois paralelos (à esquerda) e nicois cruzados (à direita), 2,5 X, luz transmitida.

### **E. Muscovitaxisto (agalmatolito canjica)**

#### **Descrição macroscópica**

A rocha apresenta coloração esverdeada e cristais ao longo da foliação, que se exibem alterados e possivelmente eram plagioclásios.



FIGURA 35 - Foto da amostra de muscovitaxisto.

#### **Descrição microscópica**

Rocha de textura granolepidoblástica, estrutura protomilonítica a foliada, granulação fina constituída essencialmente por muscovita. A forma idiomórfica dos cristais é bem preservada e eles estão ligeiramente rotacionados pela foliação, porém a transformação mineralógica é completa, não existindo qualquer vestígio do mineral original, que aparentemente se tratava de um feldspato.

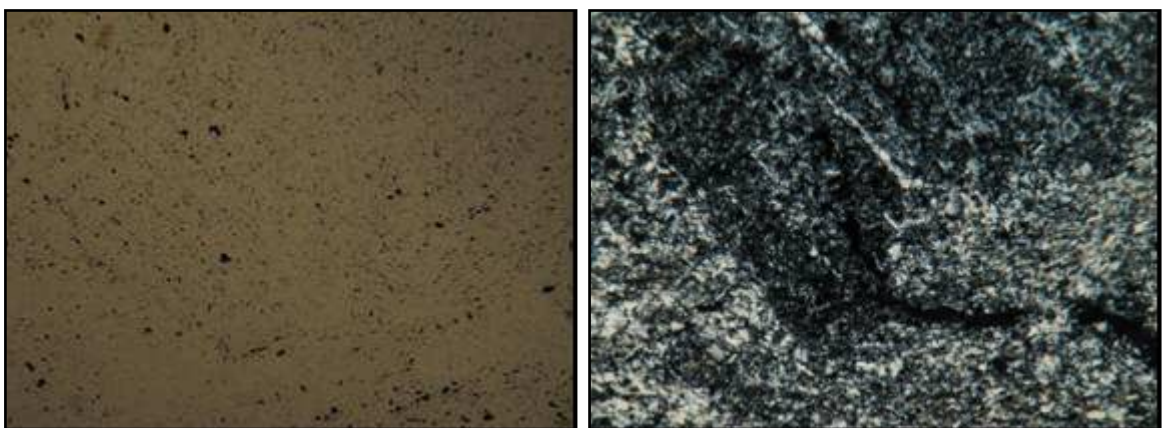


FIGURA 36 - Microfotografias: mineral de forma idiomórfica substituído por muscovita e ligeiramente rotacionado.

Nicois paralelos à esquerda e cruzados à direita (10x objetiva) luz transmitida.

## **F. Muscovita-quartzo-agalmatolito (agalmatolito micado)**

### **Descrição macroscópica**

Rocha de coloração branco acinzentado, fortemente foliada. Composta em sua maioria de mica branca. Possui porfiroblastos acinzentados, que estão envolvidos pela foliação e se apresentam rotacionados.



FIGURA 37 - Foto de muscovita-quartzo-agalmatolito.

### **Descrição microscópica**

Rocha de textura lepidoblástica fina, estrutura foliada, constituída essencialmente por muscovita e rutilo. A mica é de granulação muito fina e o rutilo é de duas gerações: a primeira, sob a forma de grandes porfiroblastos sin tectônicos; e a segunda, tardia, em forma de grãos pequenos disseminados na massa de mica.

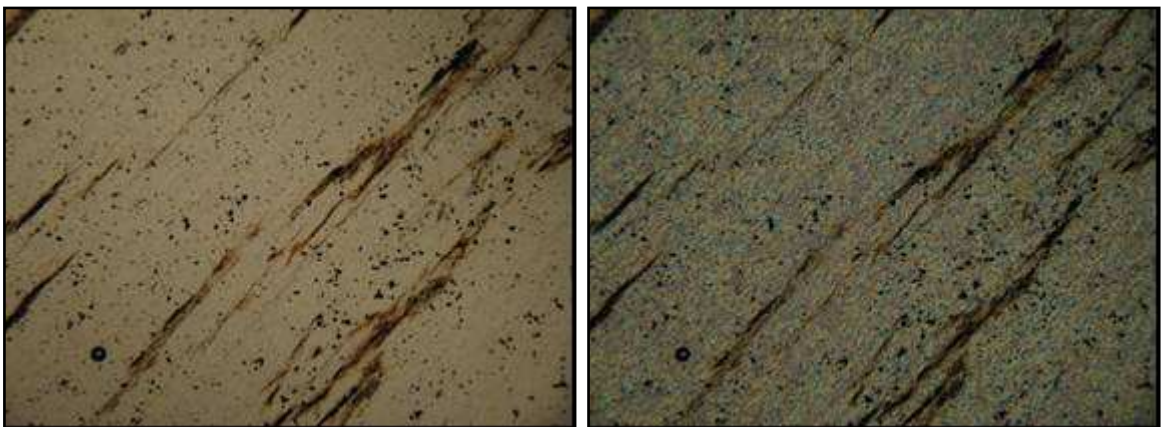


FIGURA 38 - Microfotografias: massa de muscovita com hidróxido de ferro ao longo da foliação.

Nicois paralelos à esquerda e cruzados à direita (2,5x objetiva).

**APÊNDICE B – MAPA GEOLÓGICO/ MINEIRO DO DEPÓSITO DE  
AGALMATOLITO DA SERRA DOS FERREIRAS**

**ANEXO A – MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DA  
SERRA DOS FERREIRAS – ONÇA DE PITANGUI-MG**