

**MARCONDES MENDES DE SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DE VERMICULITAS DA PARAÍBA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE MINERAÇÃO E GEOLOGIA

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS

CAMPINA GRANDE – PB

ABRIL 2004

---

**MARCONDES MENDES DE SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DE VERMICULITAS DA PARAÍBA**

---

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

**Área de Concentração:** Tratamento de Minérios

**Orientador:** Prof. Dr. Elbert Valdiviezo Viera

Campina Grande

Abril 2004



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL-UFCC

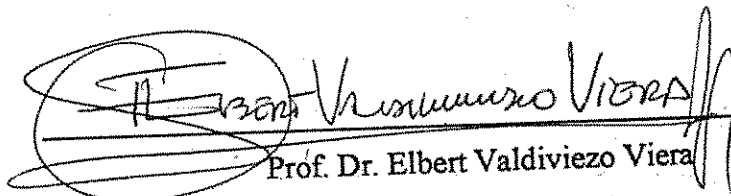
S729c Souza, Marcondes Mendes de  
Caracterização e processamento de vermiculitas da  
Paraíba/Marcondes Mendes de Souza. – Campina Grande:  
UFCC, 2004.  
88 p.: il.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). UFCC/  
CCT.  
Inclui bibliografia  
1. Vermiculita 2. Caracterização. 3. Concentração  
4. Esfoliação I. Título

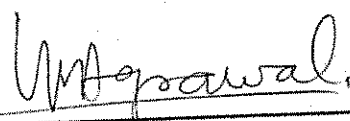
CDU 622.3: 679. 867

MARCONDES MENDES DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DE VERMICULITAS DA PARAÍBA

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Elbert Valdiviezo Viera  
Orientador

  
Prof. Dr. Vishwambhar Nath Agrawal

  
Prof. (a) Dra. Raquel Franco de Souza Lima

Campina Grande – PB, 2004.

À minha mãe, por toda ajuda, apoio, dedicação e carinho, que durante esta caminhada esteve sempre comigo acreditando no meu sucesso.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a **DEUS**, por todas as glórias, sucesso e realizações de mais etapa tão significativa em minha vida.

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Elbert Valdiviezo Viera, pelo seu empenho, confiança, incentivo e paciência para comigo. "Muito obrigado".

A minha mãe Anita Mendes de Souza, irmão, Marcos, Marillac e Ligia pelo o apoio e compreensão.

A minha noiva, Luciana J. D. Bezerra por está sempre ao meu lado com muito amor, confiante da minha vitória.

Aos amigos, professores e funcionários da graduação e pós-graduação do Curso de Engenharia de Minas, agradeço-os, pois todos foram importantes para o meu desempenho com sucesso na minha pesquisa.

A coordenação do Curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas, em nome do Dr. Aarão de Andrade Lima.

A secretária do Curso de Pós - Graduação, Maria Carmelo M. Coutinho, pelo o apoio dado durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho.

A POLIGRAN na pessoa do Sr. Diretor Presidente Antônio S. Toledo, pela a credibilidade, respeito e permissão, para que fosse desenvolvida a pesquisa com amostras do material (minério) da empresa.

A UBM na pessoa do Sr. Diretor Presidente Stanislaw Luchan, por ter concedido amostras de vermiculita e do minério, para a realização da nossa pesquisa.

## RESUMO

Este trabalho objetivou a caracterização tecnológica de amostras de minérios de vermiculita da Paraíba, em termos de composição química e mineralógica, concentração, com destaque para o processo de esfoliação térmica. As amostras selecionadas para o presente estudo procedem da jazida de vermiculita de Santa Luzia e da ocorrência de Casserengue. Nos ensaios de concentração, os minérios foram separados em frações granulométricas, as quais foram submetidas a concentração gravimétrica e/ou separação magnética. Na esfoliação, foi estudada a influência de algumas variáveis relevantes ao processo, tais como: granulometria do material, tempo de residência e temperatura. Os resultados mostraram que no minério de Santa Luzia, a vermiculita foi identificada em placas ou em partículas bem como compondo placas com interstratificações de vermiculita e biotita. Esta vermiculita apresenta-se com pouca uniformidade mineralógica e alto grau de alteração; porém, estas características pouco afetam as suas propriedades de esfoliação. No minério de Casserengue, o mineral predominante é a biotita, e a vermiculita encontra-se em menores proporções. Por causa dos baixos teores de vermiculita, o minério de Casserengue não possui potencialidade de aproveitamento industrial. Foram realizados ensaios de beneficiamento com amostras de Santa Luzia. Estes resultados foram comparados com os dados obtidos para a vermiculita de Queimada Nova, no Piauí. Os resultados dos ensaios de concentração gravimétrica e separação magnética efetuados com amostras do minério de Santa Luzia, indicaram que ambos os processos foram apropriados para o processamento das frações (-1+0,5) mm e (-0,5+0,3) mm. Os resultados de esfoliação mostraram, como era esperado, que para a otimização do processo é necessário o controle simultâneo da granulometria do material, temperatura do forno e do tempo de permanência das partículas no forno. Foi constatado que a vermiculita de Santa Luzia apresentou-se inferior em termos de capacidade de esfoliação, em comparação a vermiculita de Queimada Nova. Estas diferenças devem-se a variação na composição química e mineralógica assim como ao grau de interstratificação de vermiculita e biotita.

## ABSTRACT

This work aimed at the technological characterization of samples of vermiculite ores of Paraíba, in terms of chemical and mineralogical composition, concentration, with special prominence for the process of thermal exfoliation. The samples selected for the present study proceed of the ore body of vermiculite of Santa Luzia and of the occurrence of Casserengue. In the concentration experiments, the ores were separate in grain sizes, which the gravity concentration was submitted and/or magnetic separation. In the exfoliation, it was studied the influence of some parameters relevant to the process, such as: grain size of material, residence time and temperature. The results showed that in Santa Luzia's ore, the vermiculite was identified in plates or in particles as well as composing plates with intercrystal of vermiculite and biotite. This vermiculite comes with little mineralogical uniformity and high alteration degree; however, these characteristics little affect their exfoliation properties. In the Casserengue ore, the predominant mineral is the biotite, and the vermiculite meets in smaller proportions. Because of the low vermiculite grade, the Casserengue ore does not possess potentiality of industrial application. Were carried out processing, test with samples of Santa Luzia these results were compared with dates obtained for the vermiculite of Queimada Nova from Piauí state. The results of the tests of gravity concentration and magnetic separation made with samples of Santa Luzia's ore, they indicated that both processes were appropriate for the processing of the fractions (-1+0,5) mm and (-0,5+0,3) mm. The exfoliation results showed, as it was waited, that for the optimization of the process it is necessary the simultaneous control of the size of the material, temperature of the furnace and of the residence time of the particles in the furnace. It was verified that Santa Luzia's vermiculite came inferior in terms of exfoliation capacity, in comparison with the vermiculite of Queimada Nova. These differences are due the variation in the chemical and mineralogical composition as well as to the degree of interlayers of vermiculite and biotite.



## SUMÁRIO

|   | Página |
|---|--------|
| <b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO</b> .....                                    | 16     |
| <b>CAPÍTULO II – ASPECTOS GERAIS</b> .....                              | 18     |
| 2.1. Estrutura Cristalina e Composição química .....                    | 18     |
| 2.2. Geologia .....   | 21     |
| 2.3. Método de lavra .....  | 23     |
| 2.4. Métodos de Concentração .....                                      | 23     |
| 2.5. Reservas e Produção Brasileira.....                                | 29     |
| 2.6. Propriedades Físicas .....   | 31     |
| 2.7. Propriedades da Vermiculita Esfoliada .....                        | 31     |
| 2.7.1. Densidade .....  | 32     |
| 2.7.2. Granulometria.....   | 32     |
| 2.7.3. Condutividade Térmica .....                                      | 33     |
| 2.7.4. Capacidade de Troca Catiônica .....                              | 34     |
| 2.7.5. Capacidade de Retenção de Água .....                             | 34     |
| 2.8. Uso e Aplicações Industriais .....                                 | 34     |
| 2.8.1. Construção Civil .....   | 35     |
| 2.8.2. Indústria .....  | 35     |
| 2.8.3. Agricultura .....  | 36     |
| 2.8.4. Química .....  | 37     |
| 2.8.5. Outros Usos .....  | 37     |
| <b>CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                         | 39     |
| 3.1. Amostragem e Preparação das Amostras .....                         | 39     |
| 3.2. Ensaio de caracterização.....                                      | 40     |
| 3.2.1. Difração de Raios -X.....  | 41     |
| 3.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura .....                        | 41     |
| 3.2.3. Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termo Gravimétrica (TG)..... | 42     |
| 3.2.4. Fluorescência de Raios - X.....                                  | 42     |
| 3.3. Ensaio de Concentração .....                                       | 42     |
| 3.4. Ensaio de Esfoliação.....  | 43     |
| <b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                       | 48     |
| 4.1. Caracterização .....   | 48     |
| 4.1.1. Difração de Raios-X .....  | 48     |
| 4.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura .....                        | 54     |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.1.3. Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termo Gravimétrica (TG) ..... | 61        |
| 4.1.4. Fluorescência de Raios-X.....                                     | 64        |
| 4.1.5. Capacidade de Troca Catiônica (CTC) .....                         | 66        |
| 4.2. Concentração .....  | 68        |
| 4.2.1. Classificação Granulométrica .....                                | 68        |
| 4.2.2. Concentração Gravimétrica .....                                   | 70        |
| 4.2.3. Separação magnética .....   | 73        |
| 4.3. Esfoliação .....  | 75        |
| 4.3.1. Efeito da Granulometria .....                                     | 75        |
| 4.3.2. Efeito da Temperatura .....                                       | 78        |
| 4.3.3. Efeito do Tempo de Residência .....                               | 79        |
| <b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES .....</b>                                     | <b>81</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                  | <b>84</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| FIGURA 2.1– Representação esquemática da estrutura de uma esmectita dioctaédrica (semelhante à de uma vermiculita).....  | 19     |
| FIGURA 3.1 – Detalhes da mufla e acessórios utilizados na realização de um ensaio esfoliação de vermiculita .....  | 44     |
| FIGURA 3.2 – Detalhes de um ensaio para a determinação da MEA.....   | 45     |
| FIGURA 3.3 – Detalhes do funil utilizado no ensaio de determinação do teor de vermiculita .....  | 47     |
| FIGURA 4.1 – Difratoograma de uma amostra de vermiculita de Santa Luzia.....   | 52     |
| FIGURA 4.2 – Difratoograma de uma amostra do minério de Casserengue .....  | 53     |
| FIGURA 4.3 – Micrografia mostrando a morfologia e textura de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e sua associação com espinélio (fase mais clara). ..... | 56     |
| FIGURA 4.4 – Micrografia de uma placa de vermiculita de Santa Luzia, mostrando detalhes das inclusões de espinélio (parte mais clara).....                     | 56     |
| FIGURA 4.5 – Espectro EDS correspondente a uma partícula de espinélio (Fe-Cr) incluída na vermiculita (ponto mais claro na micrografia).....                   | 57     |
| FIGURA 4.6 – Micrografia da amostra de minério de Casserengue.....   | 58     |
| FIGURA 4.7 – Micrografia da amostra de minério de Casserengue, mostrando partículas de mica biotita .....  | 58     |
| FIGURA 4.8 – Espectro EDS de uma partícula de biotita .....  | 59     |
| FIGURA 4.9 – Espectro EDS de uma partícula de fedspato .....   | 60     |
| FIGURA 4.10 – Espectro EDS de uma provavelmente de fayalita .....  | 60     |
| FIGURA 4.11– Curvas de ATD e TG de amostras de concentrados de vermiculita de Santa Luzia .....  | 62     |

|   | Página |
|---|--------|
| FIGURA 4.12 – Curvas de ATD e TG da amostra de Casserengue, correspondente à fração (-0,295+0,208) mm do minério “r.o.m.”.....  | 64     |
| FIGURA 4.13 – Esquema adotado para os ensaios de concentração do minério de vermiculita de Santa Luzia .....  | 71     |
| FIGURA 4.14 – Efeito da granulométrica sobre a massa específica aparente (MEA) de amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e vermiculita de Queimada Nova .....                            | 77     |
| FIGURA 4.15 – Efeito da granulométrica sobre a o rendimento volumétrico da esfoliação ( $\eta$ ) de amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e vermiculita de Queimada Nova .....          | 78     |
| FIGURA 4.16 – Efeito da temperatura $T_c$ sobre o rendimento volumétrico da esfoliação ( $\eta$ ) de amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e vermiculita de Queimada Nova.....          | 79     |
| FIGURA 4.17 - Efeito do tempo de residência $t_r$ sobre o rendimento volumétrico da esfoliação ( $\eta$ ) de amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e vermiculita de Queimada Nova ..... | 80     |

## LISTA DE TABELAS

|   | Página |
|---|--------|
| TABELA 2.1 – Especificações técnicas para produtos comerciais de concentrado vermiculita por fração granulométrica, massa específica aparente (MEA), e teores (%) de vermiculita.....                         | 26     |
| TABELA 2.2 - Especificações técnicas para produtos comerciais de vermiculita por fração granulométrica, e massa específica aparente (MEA) dos produtos esfoliados .....                                       | 33     |
| TABELA 4.1– Minerais identificados por DRX em cada uma das frações granulométricas selecionadas do minério de Santa Luzia .....   | 49     |
| TABELA 4.2 – Resultados de análise química por FRX de amostras de vermiculita de Santa Luzia e Casserengue .....  | 65     |
| TABELA 4.3 – Faixas de composição química de vermiculita típica.....  | 65     |
| TABELA 4.4– Capacidade de troca catiônica das amostras de Santa Luzia e Casserengue.....  | 67     |
| TABELA 4.5 – Análise granulométrica a úmido dos minérios de vermiculita “r.o.m.”.   | 68     |
| TABELA 4.6 – Distribuição em massa (%retido) e teor de vermiculita dos minérios “r.o.m.” separados em 6 frações granulométricas .....   | 70     |
| TABELA 4.7 – Concentração gravimétrica a úmido em mesa oscilatória de algumas frações dos minérios de vermiculita de Santa Luzia e Queimada Nova .....  | 73     |
| TABELA 4.8 – Teores de vermiculita contidos nos concentrados e nos rejeitos obtidos a partir da concentração gravimétrica de algumas frações dos minérios de vermiculita de Santa Luzia e Queimada Nova ..... | 73     |
| TABELA 4.9 – Separação magnética a seco de frações granulométricas pertencentes aos minérios de vermiculita de Santa Luzia e Queimada Nova .....  | 74     |
| TABELA 4.10 – Teores de vermiculita contido nos concentrados obtidos a partir da separação magnética dos minérios de vermiculita de Santa Luzia e Queimada Nova .....   | 74     |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|   | Página |
|---|--------|
| EQUAÇÃO 2.1 – Fórmula química de uma vermiculita, obtida a partir da análise de 65 amostras de diferentes procedências, sugeriu a seguinte composição química média ..... | 19     |
| EQUAÇÃO 3.1 – Equação para o cálculo da massa específica aparente (MEA).....  | 46     |
| EQUAÇÃO 3.2 – Equação para o cálculo do rendimento volumétrico da esfoliação ( $\eta$ ) .....   | 46     |
| EQUAÇÃO 3.3 – Equação para o cálculo do teor de vermiculita .....   | 47     |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

|            |   |
|------------|---|
| Å          | Angstrons                                 |
| ABNT       | Associação Brasileira das Normas Técnicas |
| ATD        | Análise Termodiferencial                  |
| CETEM      | Centro de Tecnologia Mineral              |
| CTC        | Capacidade de Troca Catiônica             |
| DeMA       | Departamento de Engenharia de Materiais   |
| DNPM       | Departamento Nacional de Produção Mineral |
| EDS        | Energia Dispersiva de Raios X             |
| DRX        | Difração de Raios-X                       |
| <i>FOB</i> | <i>Free on Board</i>                      |
| FRX        | Fluorescência de Raios X                  |
| M          | Molar                                     |
| MCT        | Ministério da Ciência e Tecnologia        |
| MEA        | Massa Específica Aparente                 |
| meq        | Miliequivalente                           |
| mm         | Milímetro                                 |
| MEV        | Microscopia Eletrônica de Varredura       |
| MINERTEC   | Mineração e Comércio Ltda                 |
| $\eta$     | Rendimento Volumétrico da Esfoliação      |
| n.a.       | Não Analisada                             |
| n.d.       | Não detectado                             |
| P.F.       | Perda ao Fogo                             |
| POLIGRAN   | Polimento de Granitos do Brasil S/A       |
| "r.o.m."   | Run of Mine                               |
| $T_e$      | Temperatura                               |

|                |                                    |
|----------------|------------------------------------|
| t <sub>r</sub> | Tempo de Residência                |
| TG             | Termogravimétrica                  |
| T-O-T          | Tetraédrica-Octaédrica-Tetraédrica |
| UBM            | União Brasileira de Mineração      |
| WD             | Distância de Trabalho              |



## CAPÍTULO I

### 1 – INTRODUÇÃO

A vermiculita é um mineral semelhante às micas (filossilicatos), constituída de silício, alumínio, magnésio, ferro e água, em proporções variáveis (Valdiviezo et al, 2003). Este mineral apresenta clivagem basal paralela e ocorre em placas constituídas por finíssimas lamínulas superpostas com espessuras em torno de 9,3 Å (Amgstrons). Para ser atingida uma espessura de 1mm são necessárias mais de 1 milhão dessas placas. O espessamento entre as lamínulas é variável e, na maioria das vezes, depende da natureza e tipo de moléculas locadas na região de separação entre elas (Leitão, 2003).

No estado natural, os espaços interlamelares ocupados por água são da ordem de 14,2 Å. Essa água interlamelar não está submetida a ligações fortes podendo ser quase ou totalmente removida através de aquecimento moderado. Quando há total remoção da água o espessamento se retrai para cerca de 9,3 Å, que corresponde a espessura de uma lamínula (Grim, 1962, 1968; Santos, 1989; Valdiviezo, 2003).

Uma propriedade interessante da vermiculita é a sua excelente capacidade de troca catiônica. Este comportamento deve-se a que suas lamínulas individuais são constituídas por duas placas ligadas a uma placa central composta de íons divalentes e monovalentes positivos como  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^{+}$  e  $K^{+}$ . As ligações desses íons presentes no espaço entre as lamínulas são

relativamente fracas, permitindo que os mesmos sejam removidos e substituídos estequiometricamente, sem alteração da estrutura das lamínulas (Santos, 1989).

A principal característica que a diferencia de outras micas, como a moscovita, é que quando as placas de vermiculita são submetidas a temperaturas acima de 900 °C, a água de hidratação contida entre as suas milhares de lâminas se transforma em vapor, expulsando-a de modo irreversível, constituindo flocos. A esfoliação ou piroexpansão ocorre na direção perpendicular ao plano basal e provoca um aumento de até 30 vezes o volume inicial. Esses flocos, denominados de vermiculita esfoliada ou expandida, apresentam uma elevada área superficial específica e pequena massa, em comparação com a vermiculita natural (Castro, 1996).

Esta especial propriedade concede ao mineral uma grande importância industrial em decorrência da diversidade de aplicações, seja como isolante térmico e acústico, na purificação de águas ricas em sais dissolvidos e na remoção de camadas poluentes de petróleo na superfície de águas oceânicas, entre muitas outras (Leitão, 2003).

Este trabalho objetivou: (a) caracterização tecnológica das vermiculitas da Paraíba visando aplicações convencionais e, eventualmente, aplicações não convencionais; (b) obter subsídios que propiciem um melhor conhecimento dos minérios e a maximização do seu aproveitamento, com destaque para o processo de esfoliação térmica; (c) estudar a influência de algumas variáveis (granulometria, tempo de residência e temperatura) relacionadas ao processo de esfoliação, visando fornecer informações para melhorar a compreensão dos fatores determinantes do processo.

## CAPITULO II

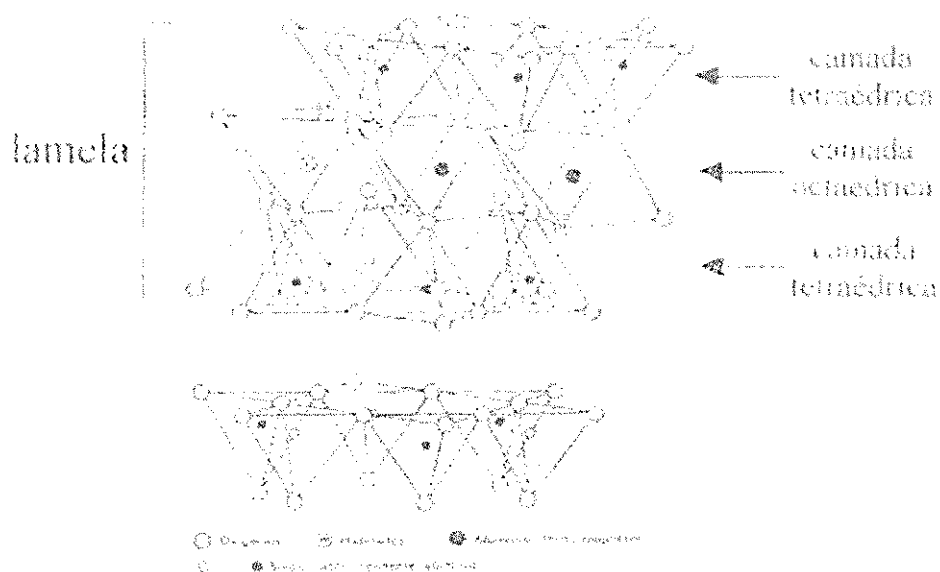
### 2 – ASPECTOS GERAIS

#### 2.1. Estrutura Cristalina e Composição Química

A vermiculita possui uma cela unitária do tipo 2:1, constituída por duas folhas tetraédricas e uma octaédrica entre elas. As folhas tetraédricas são compostas por tetraedros do silício ( $\text{SiO}_4$ ), onde ocasionalmente o silício pode ser substituído isomorficamente pelo alumínio. As folhas octaédricas são formadas de átomos de alumínio, oxigênio e hidrogênio, compondo  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , onde o alumínio pode ser substituído por  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , ou por outros elementos. As camadas T-O-T (tetraedro-octaedro-tetraedro) são separadas por duas ou mais camadas de moléculas de água arranjadas em formato ou estrutura hexagonal, onde os cátions trocáveis, principalmente  $\text{Mg}^{2+}$ , e também  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$ , encontram-se localizados entre as folhas de moléculas de água (Valdiviezo et al., 2002; Santos, 1989, 1975, 1992).

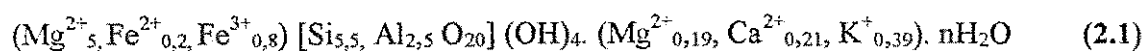
Na estrutura cristalina da vermiculita, as cargas envolvidas nela, encontram-se desbalanceadas, principalmente por substituições isomórficas nas camadas tetraédricas do  $\text{Si}^{4+}$  pelo  $\text{Al}^{3+}$ . Essas substituições podem ser parcialmente compensadas por outras substituições; porém, existe um excesso de cargas negativas, ou seja há uma deficiência de cargas positivas, as quais conduziriam a manter a eletroneutralidade do sistema. Esta deficiência de cargas é

compensada pelos cátions trocáveis, que conforme foi colocado anteriormente, são principalmente  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  e  $Na^+$  (Assunção, 1985; Velde, 1992).



**FIGURA 2.1** – Representação esquemática da estrutura de uma esmectita dioctaédrica, onde duas das três posições da camada octaédrica estão preenchidas por cátions. Essa estrutura é semelhante a de uma vermiculita dioctaédrica (Aranha, 2002).

A fórmula química de uma vermiculita, obtida a partir da análise de 65 amostras de diferentes procedências, sugeriu a seguinte composição química média (Hindman, 1994).



Onde os elementos do primeiro parêntese correspondem aos cátions da camada octaédrica, e os componentes colocados entre colchetes correspondem à camada tetraédrica. Os componentes que estão dentro do último parêntese são os cátions trocáveis. Em geral, uma

vermiculita possui baixo teor de potássio; Porém, quando este elemento está presente deve-se à existência de camadas de micas, principalmente de biotita (Hindman, 1994).

As vermiculitas apresentam diferentes composições químicas, mesmo aquelas encontradas em um mesmo depósito ou em áreas próximas. A análise química para a maioria das vermiculitas de interesse econômico encontra-se dentro dos seguintes valores:  $\text{SiO}_2$  (38-46 %);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10-16 %);  $\text{MgO}$  (16-35 %);  $\text{CaO}$  (1-5 %);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (6-13 %);  $\text{TiO}_2$  (1-3 %);  $\text{K}_2\text{O}$  (1-6 %);  $\text{H}_2\text{O}$  (8-16 %); outros (0,2-1,2 %). A vermiculita da mina de Phalabora, localizada na África do Sul, apresenta em média a seguinte composição química:  $\text{SiO}_2$  (39,4 %);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12,1 %);  $\text{MgO}$  (23,4 %);  $\text{CaO}$  (1,5 %);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (5,5 %);  $\text{TiO}_2$  (1,3 %);  $\text{K}_2\text{O}$  (2,5 %);  $\text{H}_2\text{O}$  (11,2 %);  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,8 %);  $\text{MnO}$  (0,3 %) ([www.vermiculite.org](http://www.vermiculite.org), 2002).

Em relação às jazidas do Nordeste do Brasil a composição química média da vermiculita da mina de Queimada Nova, é a seguinte:  $\text{SiO}_2$  (45,1 %);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10,2 %);  $\text{MgO}$  (23,6 %);  $\text{CaO}$  (3,8 %);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (5,8 %);  $\text{TiO}_2$  (0,7 %);  $\text{K}_2\text{O}$  (0,5 %);  $\text{H}_2\text{O}$  (10,2 %);  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,1 %);  $\text{MnO}$  (n.d: “não detectado”) ([www.vermiculite.org](http://www.vermiculite.org), 2002). Em comparação à vermiculita de Phalabora, o mineral da mina de Queimada Nova, localizada no Piauí, apresenta diferença nos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ . Os teores de  $\text{MgO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  são muito próximos, enquanto que o teor de água interlamelar ou intercamada é superior no mineral de Phalabora.

## 2.2. Geologia

A origem da vermiculita é assumida como sendo proveniente da ação do intemperismo sobre os minerais biotita e flogopita. Os piroxênios, anfibólios e olivinas, minerais componentes de rochas ultramáficas (ígneas) e metamórficas, bem como sienitos, carbonatitos, foram primeiro alterados para formar biotita, flogopita, serpentina e clorita. A alteração supergênica deu-se pela circulação de água, que removeu álcalis, redistribuiu o magnésio e acrescentou água, a qual foi intercalada nas camadas intercristalinas, para formar vermiculita (Castro, 1996).

A biotita é o mineral mais freqüentemente associado aos depósitos de vermiculita. Outros minerais como quartzo, feldspato, apatita, coríndon, clorita, asbesto, argila e talco, estão sempre presentes, em maior ou menor proporção. A semelhança da estrutura cristalina da biotita com a da vermiculita, permite um acompanhamento através das interligações moleculares numa seqüência que se inicia na biotita pura e se estende até a vermiculita pura (Castro, 1996; Hindman, 1994).

As vermiculitas podem ser encontradas como macro e microvermiculitas. As macrovermiculitas estão constituídas de placas grandes, bem desenvolvidas, e são de estrutura cristalina trioctaédrica (Basset citado por Assunção, 1985). As microvermiculitas possuem dimensões microscópicas próprias de argilominerais, apresentam uma maior variação de sua composição química, o que dificulta diferenciá-las das esmectitas, e podem ser di ou trioctaédrica. Nas dioctaédricas, duas das três posições da camada octaédrica estão preenchidas e nas do tipo trioctaédrica as três posições estão preenchidas por cátions (Guarino, 1999).

Os depósitos que apresentam aplicações industriais são, em geral, de macrovermiculitas, classificados de acordo com a natureza da rocha matriz em quatro categorias, que são: (a) ocorrência em rochas máficas e ultramáficas; (b) ocorrência em xistos e gnaisses; (c) ocorrência em rochas carbonatíticas; e (d) ocorrência em rochas graníticas (Hindman, 1994).

Os maiores depósitos comerciais do mundo ocorrem em rochas máficas e ultramáficas e o material minerado é, normalmente, constituído de camadas mistas ou interestratificadas de biotita + vermiculita ou de flogopita + vermiculita (Hennies e Stellin, 1976). Por outro lado, não existe um critério único para quantificar o limite entre micas (biotita ou flogopita) e a vermiculita, surgindo muita confusão quanto ao que deve ser caracterizado como minério de aproveitamento industrial. Somente as informações apresentadas pelas grandes empresas que operam no setor, podem ser consideradas confiáveis (Castro, 1996).

Em relação à geologia de depósitos brasileiros, a jazida de Queimada Nova - PI, esta é constituída por rochas básicas e ultrabásicas, compondo um corpo de forma aproximadamente elíptica. A vermiculita ocorre na rocha básica, provavelmente um lamprófito com granulação fina e disseminada na mesma, constituída de biotita (vermiculita 50 %), clinopiroxênio (25 %), álcali-feldspato (12 %), anfibólio (8 %) e apatita (5 %), além de alguns minerais acessórios em quantidade pequena como titanita e calcita (Hennies e Stellin, 1976; Parente, 1989).

Ainda comentando sobre a vermiculita de Queimada Nova -- PI, esta ocorre também associada à rocha básica, sob forma de veios pegmatóides. Nesses veios aparecem os mesmos

minerais que os da rocha básica, embora com teores menores. A vermiculita surge como grandes placas de cor amarela a verde-bronze, alcançando proporção da ordem de 60 %, enquanto anfibólios e piroxênios, em cristais bem desenvolvidos, atingem 30 %, biotita, caulim e quartzo totalizam os 10 % restantes. Nos veios pegmatóides, a vermiculita apresenta granulação grossa, constituindo "placas" que podem ter espessuras superiores a 10 cm. Na rocha básica ela possui granulação fina, encontrando-se disseminada na mesma (Hennies e Stellin, 1983; Parente, 1989, 1986).

### **2.3. Método de Lavra**

A vermiculita, usualmente, é extraída por métodos de lavra a céu aberto. A lavra se inicia pelo desmatamento, seguida pela remoção da cobertura ou camada de estéril, e extração do minério. Por se tratar de um mineral de fragmentação baixa (friável) e placoso, não há necessidade de uso das operações de perfuração e desmonte com explosivos. A extração é executada por trator ou retroescavadeira, o que permite maior rapidez nos serviços (Castro, 1996).

### **2.4. Métodos de Concentração**

O processamento da vermiculita pode ser efetuado através de dois métodos, que são: (a) via seca; e (b) via úmida ou combinação úmida/seca. No caso de processamento a seco, o minério é previamente submetido à secagem. Em regiões de baixos índices pluviométricos pode ser realizada em pátios, com o calor do sol. Em lugares onde os índices de pluviometria são altos, o



minério deve ser primeiramente seco em secadores rotatórios. Por outro lado, quando o minério está associado a argilas, o processo a úmido é aconselhável (Castro, 1996; Hindman, 1994).

Em geral, a concentração de vermiculitas visa à obtenção de produtos classificados, conforme citados mais adiante, limitando o conteúdo de impurezas não expansíveis. Com isso, melhora-se o rendimento dos fornos expansores. No processo a seco utiliza-se com bastante frequência peneiras convencionais para as granulometrias grosseiras e peneiras especiais para as granulometrias finas (Castro, 1996; Minebra, 2002).

A operação de moagem normalmente é feita em moinhos de impacto, que produzem a separação das placas de maior espessura, evitando a cominuição excessiva do produto. É importante ressaltar que os processos de lavra e de beneficiamento devem manter a granulometria com o mínimo de alteração possível, já que o valor do concentrado decresce com o decréscimo da granulometria (Hindman, 1994).

A primeira etapa de concentração separa os pós, que correspondem à maior parte da massa que alimenta a usina. A seguir, se classifica o minério, em 4 ou 5 faixas granulométricas, para finalmente cada uma dessas faixas serem separadas por gravimetria em um separador pneumático. Estes nada mais são do que um túnel de vento, no qual as partículas são separadas em função de sua densidade. A separação ocorre pelas diferentes trajetórias das partículas quando submetidas à corrente de ar. As placas de vermiculitas são arrastadas e depositadas em coletores de produto; enquanto que as pedras ou partículas esféricas são depositadas em coletores de rejeito (Hindman, 1994; Sampaio et al., 2001).

Os processos em via úmida ou úmida/seca variam em função dos seguintes fatores:

(a) tipo de jazida; (b) composição do mineral; (c) disponibilidade de água; (d) quantidade de reservas; e (e) capacidade da usina de beneficiamento. O minério associado a minerais argilosos, deve ser primeiro deslamado em classificadores helicoidais, e separados da ganga por gravimetria utilizando-se espirais, mesas vibratórias ou ainda jiques. Os produtos devem ainda, por razões de economia de energia, serem submetidos a desaguamento e em seguida a secagem em secadores rotatórios. Nestes últimos, a temperatura do ar não deve ser superior a 200 °C, sob o risco de produzir pré-expansão da vermiculita (Castro, 1996).

Os produtos secos devem ser separados em faixas granulométricas através de peneiras e concentrado em classificadores pneumáticos (Castro, 1996). Na TABELA 2.1 são apresentadas as especificações técnicas para concentrados comerciais de vermiculita, de acordo com as normas da “The Vermiculite Association”, Eucatex e NBR ([www.vermiculite.org](http://www.vermiculite.org), 2002; Eucatex, 1994).

**TABELA 2.1** - Especificações técnicas para produtos comerciais de concentrado de vermiculita por fração granulométrica, massa específica aparente (MEA), e teores (%) de vermiculita.

|   | PENEIRA<br>mm      | GRANDE  | MÉDIO   | FINO    | SUPERFINO | MICROFINO |
|---|--------------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| Distribuição granulométrica (% retido). (acumulado) | +8-16              | --      | --      | --      | --        | --        |
|   | +6,35-8            | 5-25    | --      | --      | --        | --        |
|   | -3,36+6,35         | 85-89   | 5-30    | --      | --        | --        |
|   | -2+3,36            | 95-100  | 65-85   | 0-10    | --        | --        |
|   | -1,19+2            | 97-100  | 90-100  | 35-60   | 0-1       | --        |
|   | -0,5+1,19          | 99-100  | 99-100  | 90-100  | 60-100    | 0-15      |
|   | -0,3+0,5           | --      | --      | 99-100  | 95-100    | 70-95     |
|   | -0,21+0,3          | --      | --      | --      | 99-100    | 90-100    |
|   | -0,15+0,21         | --      | --      | --      | --        | 98-100    |
| (MEA)   | Kg.m <sup>-3</sup> | 710-800 | 800-900 | 850-950 | 900-1000  | 900-1000  |
| Teor (%) de vermiculita                             | média              | 94      | 94      | 92      | 87        | 85        |
|   | faixa              | 90-98   | 85-98   | 84-96   | 82-92     | 80-90     |
| Umidade Máxima a 40 °C                              | %                  | 1       | 1       | 1       | 1         | 1         |

Fonte: *The Vermiculite Association, Eucatex e NBR, 2002.*

A título de exemplo será descrito sucintamente o fluxograma de beneficiamento para um minério brasileiro. O processamento da vermiculita de Queimada Nova-PI é realizado a seco e se constitui das seguintes etapas: (Castro, 1996).

#### (a) Alimentação

O minério "r.o.m", de conformação terrosa, após lavra a céu aberto e secagem em terreiros até a umidade de 1 a 2 %, é encaminhado para a moega de alimentação e desta é, por

alimentador vibratório de capacidade variável, alimentado à usina via transportador de correia e descarregado na peneira primária de classificação, que gera 4 (quatro) produtos, a saber: material grosseiro (+1" ou 1½"), que é descartado como rejeito; material graúdo (-1"ou -1½" ) e 5,5 mm, que alimenta o britador de martelos; material classificado (-9,5 + 2,5) mm, que juntamente com o produto do britador é encaminhado ao circuito de classificação de grande (G) e médio (M); material fino (F), que vai para a pré-classificação pneumática.

#### **(b) Pré-classificação Pneumática**

O passante na peneira primária (-2,5) mm passa por uma classificação pneumática (modelo *winnover* + ciclone de pó) gerando um produto fino classificado e uma fração (-0,5 mm) que é descartada como rejeito. O produto aqui classificado vai para o circuito de finos.

#### **(c) Circuito de Grande e Médio**

O material intermediário do peneiramento primário (-9,5+2,5) mm é classificado em peneiras inclinadas gerando 3 (três) produtos, que são: fração grande (-9,5+5,0) mm, a ser concentrado em *winnover*; fração média (-5+2,5) mm, a ser concentrado em *winnover*; fração fina (-2,5+0,5) mm que vai para o circuito de finos; e rejeito micron (-0,5) mm.

#### (d) Circuito de Finos

O material classificado na pré-classificação pneumática, juntamente com a fração fina do circuito de Grande e Médio, é alimentado em duas peneiras horizontais. O retido (+1,25) mm é material fino (F) classificado e vai para o silo pulmão de minério fino. Daqui é retomado por alimentador vibratório de frequência variável e alimentado a um *winnover* gerando um rejeito (pedras), um concentrado (fino), um misto que é moído e recirculado juntamente com o misto do circuito de Grande e Médio. Estes mistos são alimentados na peneira de classificação do circuito de Grande e Médio. O passante nas peneiras horizontais (-1,25) mm é encaminhado ao circuito de Superfino (SF).

#### (e) Circuito de Superfino

Parte do material proveniente do circuito de finos é alimentado em duas peneiras inclinadas com tela de 0,5 mm. O retido nestas peneiras com o restante oriundo daquele circuito, alimenta um conjunto de 4 (quatro) peneiras horizontais, para classificação do material superfino. Tanto o passante nas duas peneiras inclinadas como o passante nas peneiras horizontais são descartados como rejeito micron (-0,5 mm).

O retido nas peneiras horizontais descarrega em um silo pulmão, que alimenta dois circuitos paralelos de concentração pneumática. São gerados os seguintes produtos: Superfino (SF); rejeitos (pedras); um misto que recircula sem moagem. Além disso, o ciclone de pó dos dois *winnover* retém mais uma fração de rejeito micron. O sistema pneumático (exaustor e

ciclone) é comum ao circuito de finos. Adicionalmente o circuito de superfino possui uma peneira vibratória inclinada para eliminação de material micron (-0,5 mm) do concentrado de um dos *winnover*.

Alguns dados de produção da Usina de Queimada Nova são: alimentação (695 t/dia); teor médio na alimentação (14,14 % de vermiculita); teor médio no rejeito (5,51 % de vermiculita); recuperação de vermiculita (42,01 %); rendimento em massa (6,68 %); degradação da vermiculita (21,66 %), corresponde à percentagem de vermiculita presente na alimentação cuja granulometria em consequência do beneficiamento passou a (-0,5) mm.

## **2.5. Reservas e Produção Brasileira**

No Brasil, os principais depósitos de vermiculita situam-se nos estados de Goiás, Bahia, Piauí, Paraíba e Paraná. Ocorrências são citadas, no Anuário Mineral Brasileiro de 2001, nos estados de Minas Gerais, Ceará, Maranhão, São Paulo e Rio de Janeiro, fazendo um total de 17,7 milhões de toneladas de reservas medidas, indicadas e inferidas do mineral (Cavalcanti, 2002).

Os dados estatísticos sobre reservas e produção mundial indicaram que no Brasil, as reservas correspondem a 8,13 % do total e a produção brasileira em 2000 participou com 4,08 % do total produzido, concedendo ao país o quarto lugar na produção global de concentrado de vermiculita. Quatro empresas foram responsáveis por essa produção: (a) Eucatex Mineração do Nordeste S.A., que opera no estado do Piauí, responde por 57,0 %; (b) Mamoré Mineração e (c)

Minertec Mineração e Comércio Ltda., ambas em Gotás; e (d) Mineração Phoenix, na Bahia, produziram o restante (DNPM 2000 - 2001).

No ano 2000, a Eucatex produziu 14.107 toneladas de concentrado de vermiculita, sendo a maior parte destinada ao mercado interno, cerca de 76 % do material produzido. Atualmente, a maioria de aplicações de vermiculita esfoliada está direcionada tradicionalmente para a construção civil e setor industrial. Porém, aplicações na agricultura e especialmente na horticultura, vêm ganhando espaço e já ocupam uma posição de destaque, principalmente, no cenário internacional. (Castro, 1996).

Dados estatísticos fornecidos pela Eucatex Mineração do Nordeste S.A, com base no Relatório Anual de Lavra, mostraram que em 2001, a produção de concentrados de vermiculita foram de: (a) Prêmio 0 t; (b) Grande 117 t; (c) Médio 1.754 t; (d) Fino 4.157 t; (e) Superfino 8.542 t; e (f) Microfino 0 t. No caso da União Brasileira de Mineração, que opera no município de Santa Luzia, estado da Paraíba, produziu três tipos de concentrados: Médio, Fino e Superfino. A quantidade de rejeitos gerados pela usina da Eucatex nos últimos anos foi de: (a) 100.500 t (1999); (b) 93.853 t (2000); e (c) 97.133 t (2001). Ao longo de 10 anos de atividades a usina produziu em torno de 1 milhão de toneladas (Valdiviezo, 2003).

Para os próximos anos, há bastante incerteza quanto à evolução do mercado mundial de vermiculita, propiciado, entre outros fatores, pelo: (a) crescimento de sua substituição por outros materiais ou minerais; (b) contaminação com asbestos (tremolita); (c) decréscimo cada vez mais acentuado das frações nobres, denominadas no mercado de Prêmio (8-16) mm, Grande (4-8) mm

e Médio (2-4) mm; e aumento das frações finas, denominadas de Fina (1-2) mm, Superfino (0,5-1) mm e microfina (0,3-0,5) mm, as quais apresentam preços relativamente inferiores. No mercado internacional, o concentrado de vermiculita “Grande” é cotado a preço de US\$ 220,00 a 225,00 por tonelada. Enquanto que o concentrado “Superfino” é cotado de US\$ 70 a 80 por tonelada (Castro, 1996; [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov), 2000; Potter, 2002).

## **2.6. Propriedades Físicas**

As principais características da vermiculita são mencionadas a seguir: sua coloração varia de amarelo pardo, amarelo ouro, amarelo bronze, marrom, verde escuro e pardo; brilho nacarado; dureza de 1 a 3 na escala de Mohs, dependendo da sua composição; peso específico de 2,27 a 2,80; clivagem basal; solubilidade, insolúvel em solventes orgânicos; estabilidade resistente a agentes de decomposição. Não se altera na presença de ar ou umidade; esfoliação a partir de 450 °C até 1000 °C; ponto de fusão: entre 1150 °C e 1315 °C; pH em água de 6 a 9; CTC (Capacidade de troca catiônica) de 50 a 250 meq/100 g; calor específico de 0,20 a 0,26 kcal/kg °K; condutividade térmica de 0,058 a 0,071 kcal.m/m<sup>2</sup>.h.°C a 25 °C; combustibilidade, é não combustível; espessura interlamelar: 14,2 Å no estado natural (Castro, 1996; Rosenburg, 1969).

## **2.7. Propriedades da Vermiculita Esfoliada**

No processo de esfoliação térmica da vermiculita, a água interlamelar é expulsa de forma irreversível, gerando um considerável aumento do volume, em relação ao volume original. Esta propriedade tem sido decisiva para a grande quantidade de aplicações na indústria (Melo, 1998) e tem sido um fator na determinação da qualidade do minério e dos produtos finais



(concentrados) ao ponto de ser objeto de padronização por diversas entidades como a ASTM, a ABNT e a *The Vermiculite Association* (Castro, 1996). Entre as propriedades utilizadas para se avaliar a qualidade dos concentrados encontram-se a granulometria, densidade, massa específica aparente (MEA), teor de vermiculita (%), condutividade térmica, temperatura de amolecimento e umidade, entre outras. (Valdiviezo et al, 2002; Santos, 1989).

Algumas dessas propriedades serão a continuação descrita e os valores especificados estão apresentados na TABELA 2.2.

#### **2.7.1. Densidade**

A densidade ou massa específica aparente (MEA), varia com a granulometria do produto e pode estar entre 70 a 140 kg.m<sup>-3</sup> (TABELA 2.2).

#### **2.7.2. Granulometria**

Em geral, no mercado internacional, tem sido convencionado a classificação granulométrica do concentrado em quatro ou cinco frações, que geram após a esfoliação produtos com as características apresentadas na TABELA 2.2.

### 2.7.3. Condutividade Térmica

Após esfoliação, a vermiculita contém uma grande quantidade de espaços entre lamelas os quais são preenchidos pelo ar, que fica confinado, constituindo com isso um material de alta porosidade. Esta é uma característica importante para a maioria de aplicações como isolante térmico.

**TABELA 2.2** - Especificações técnicas para produtos comerciais de vermiculita por fração granulométrica, e massa específica aparente (MEA) dos produtos esfoliados.

|  | PENEIRA<br>mm   | PRÊMIO       | GRANDE  | MÉDIO   | FINO   | SUPERFINO   | MICROFINO  |
|--|---|--------------|---|---|--|---|--|
| Distribuição granulométrica (% retido) (acumulado) | -8+16<br>-4+8<br>-2+4<br>-1,2+2,4<br>-0,6+1,2<br>-0,3+0,6<br>-0,15+0,3<br>-0,15 |              | --<br>0-20<br>55-95<br>70-100<br>85-100<br>90-100 | --<br>0-1<br>10-45<br>55-95<br>75-100<br>85-100<br>90-100 | --<br>--<br>0-1<br>5-35<br>65-95<br>80-100<br>90-100<br>95-100 | --<br>--<br>--<br>0-1<br>10-45<br>70-95<br>90-100<br>95-100 | --<br>--<br>--<br>--<br>--<br>10-60<br>70-95<br>90-100 |
| (MEA)  | Kg.m <sup>-3</sup>  | 56-72        | 64-85   | 72-90   | 75-112   | 80-144  | 90-160   |
| Condutividade térmica a 25 °C                      | (kcal.m/<br>m <sup>2</sup> .h.°C)   | 0,070        | 0,070   | 0,070   | 0,070  | 0,070   | 0,070  |
| Temperatura de amolecimento                        | Inicial °C<br>Final °C  | 1260<br>1350 | 1260<br>1350                                      | 1260<br>1350  | 1260<br>1350   | 1260<br>1350  | 1260<br>1350   |
| Umidade máx.                                       | %   | 7            | 7   | 7   | 7  | 7   | 7  |

Fonte: *The Vermiculite Association*. [www.vermiculite.org](http://www.vermiculite.org), 2002.

#### **2.7.4. Capacidade de Troca Catiônica**

A vermiculita natural apresenta propriedades comuns às argilas, destacando-se sua elevada capacidade de intercâmbio iônico, ou catiônico (50 a 250 meg/100 g), o que lhe concede facilidade para formação de complexos com substâncias orgânicas. As ligações dos íons ( $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , e  $K^+$ ) presentes no espaço interlamelar são relativamente fracas o que permite que estes sejam removidos e substituídos estequiometricamente, sem alteração da estrutura das lamelas (Santos e Navajas, 1981).

Esta propriedade tem elevada importância nas aplicações da vermiculita na agricultura, onde atua como veículo transportador de nutrientes orgânicos e de defensivos agrícolas.

#### **2.7.5. Capacidade de Retenção de Água**

A elevada porosidade da vermiculita esfoliada lhe concede uma propriedade de grande importância como retentora de água. A vermiculita esfoliada pode reter água em até 5 vezes o seu próprio volume. Esta especial propriedade a torna muito útil em aplicações como condicionador de solos, aumentando a porosidade dos solos e retenção de umidade. Este comportamento é valioso em áreas onde a água é escassa.

#### **2.8. Usos e Aplicações Industriais (Castro, 1996, Hindman, 1994)**

As propriedades da vermiculita, principalmente na forma expandida, a tornam um material de inúmeras aplicações em diversos setores entre os quais podem citar-se os seguintes:

### 2.8.1. Construção civil

A vermiculita expandida é usada na construção civil como isolante termo-acústico para lajes, placas, calhas e paredes e como agregado leve para concreto estrutural substituindo a brita na argamassa. Na proteção e impermeabilização em lajes de cobertura, em substituição do tijolo de cerâmica e em câmaras a prova de som e de fogo. Como forro decorativo e acústico a prova de fogo e em miolos de divisórias e portas “corta-fogo”.

Como material injetado em cavidades, tubulações e equipamentos e, também jateado em telhado e superfície para isolamento rápido e eficiente contra o calor, impedindo também a infiltração de água e a corrosão. Enchimento de caixões perdidos em estruturas de concreto. Enchimento de espaços em alvenarias. Preparação de argamassas asfálticas anti-vibratórias e acústicas para recobrimento de assoalhos de madeira. Preparação de argamassa acústicas e decorativas a base de gesso e vermiculita. Proteção térmica de impermeabilizantes em lajes expostas ao tempo. Na construção de fossos para piscina de vinil, como camada de apoio e amortecimento.

### 2.8.2. Indústria

Na indústria os principais usos são como *sprays* contra fogo, fabricação de peneiras moleculares, silenciosos para carros, óleos lubrificantes para aumento da viscosidade, embalagens a prova de choques e fogo, absorvente de umidade, elementos filtrantes, tijolos e argamassas isolantes termoacústicas e anticorrosivas, painéis divisórios para ambientes, juntas de

dilatação em estruturas, lã de vidro em mantas, painéis e calhas em diversas espessuras, emulsões asfálticas e em tintas para carros, entre outros. Como isolante térmico em equipamentos submetidos a aquecimento como fornos, muflas, estufas, caldeiras, reatores, turbinas, etc. Como isolante térmico fundição e siderurgia, na indústria do cimento, vidro, petroquímica, papel e celulose, alumínio, etc. Na fabricação de tijolos isolantes silico-aluminosos, para temperaturas até 1200 °C. Na proteção contra fogo de estruturas navais ou em plataformas de extração de petróleo. Em moldes de fundição, para normalizar o esfriamento do material fundido.

### **2.8.3. Agricultura**

O emprego da vermiculita na agricultura tem crescido muito e, atualmente, possui uma grande importância, principalmente no Brasil, onde tem alcançado taxas muito significativas. Na agricultura a vermiculita expandida é usada como fonte de nutrientes dos elementos cálcio, potássio e magnésio, para plantas no período de estiagem. Na produção e plantio de mudas de plantas, reflorestamentos de grandes áreas, em horticultura e jardinagem e como condicionador de solos ácidos e argilosos. Como substratos para criação em estufas de mudas, permitindo o crescimento rápido e arejado das raízes, economizando na irrigação e dando um elevado aproveitamento das sementes, facilitando o transporte das mudas devido ao seu menor peso, evitando o rompimento das raízes no replantio.

Como componente na preparação de substratos orgânicos no plantio de mudas de hortaliças, legumes, cítricos, flores, fumo e plantas decorativas. Como componente na fabricação de fertilizantes organo-minerais. Como condicionador de solos argilosos ou de baixa permeabilidade. Como retentor de água em solos arenosos. Como veículo transportador de macro e micronutrientes com a propriedade de liberação lenta, evitando a lixiviação natural destes pela irrigação. Como agente anti-adensante em grandes campos gramados como campos de pólo, de golfe e hipódromos. Como carga na fabricação de defensivos agrícolas. Em jardinagem e paisagismo, principalmente em jardins suspensos ou terraços em grandes prédios e edifícios. Para enchimento de vasos de floricultura e de uso doméstico. Em hidroponia, no plantio e criação de hortaliças e frutas.

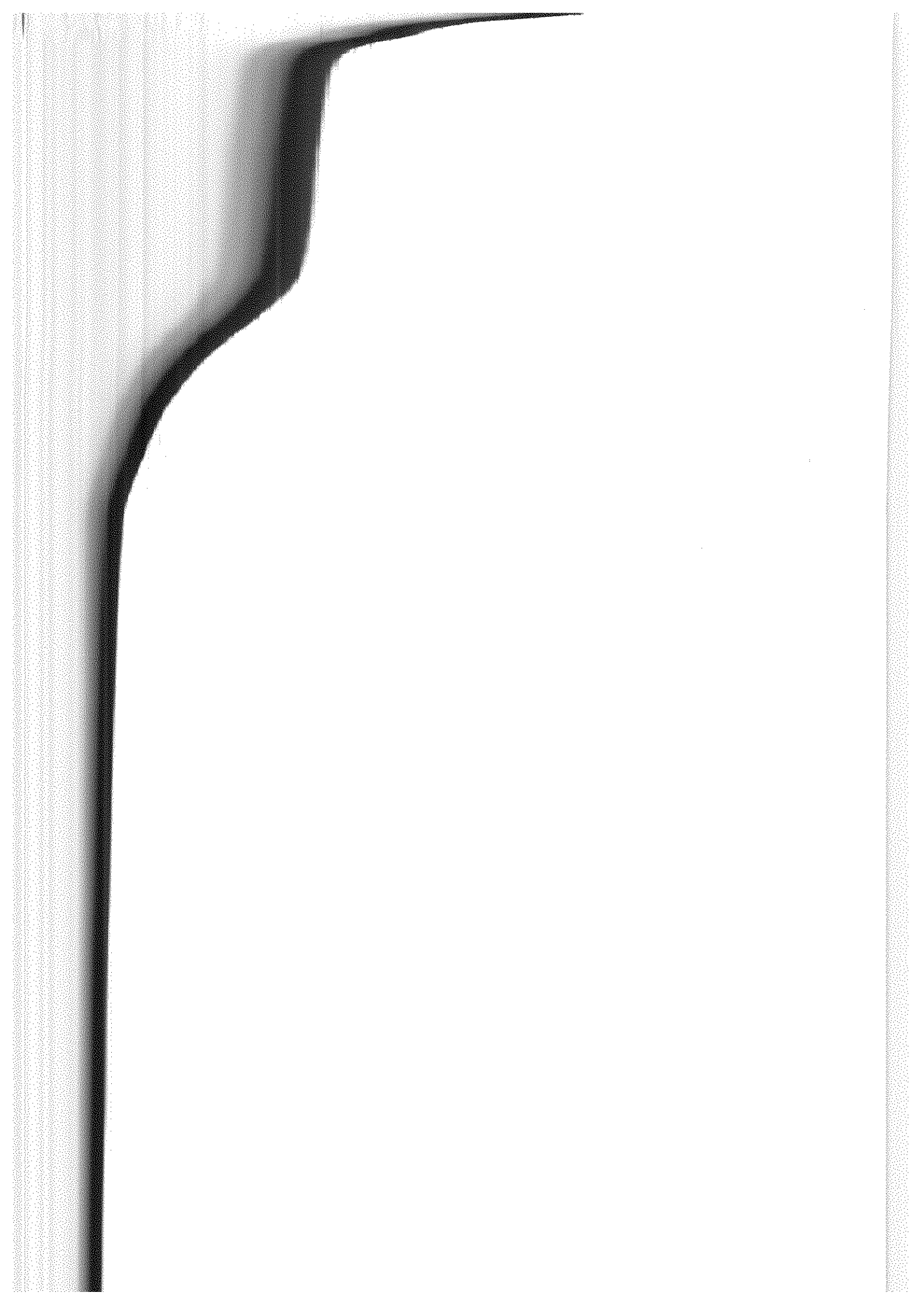
#### **2.8.4. Química**

As principais aplicações na indústria química são na elaboração de formulações químicas organo-minerais devido a sua elevada capacidade de troca iônica e de absorção de água. Como retentora de líquidos orgânicos e íons de substâncias químicas ativas devido à alta porosidade do produto expandido (Maia, 1995).

#### **2.8.5. Outros Usos**

Outras aplicações de menor porte, mas não menos interessantes tem sido desenvolvidas ao longo do tempo e podem ser citadas as seguintes. Como camada absorvente de esterco e fezes de animais e aves, absorvendo cheiro e facilitando a limpeza. Como carga na alimentação de gado bovino. Como agente de tratamento de águas poluídas. Como absorvente de óleo proveniente de

derrames em águas oceânicas. Como elemento de proteção em embalagens de produtos frágeis. Como agente anti-escorificante na produção de metais fundidos e como material auxiliar na filtração (Castelli, 1994; De Leon et al., 2001; França e Luz, 2002).





## CAPITULO III

### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Amostragem e Preparação das Amostras

Nesta etapa foram coletadas amostras dos minérios. Os depósitos selecionados para o presente estudo pertencem às empresas: União Brasileira de Mineração – UBM, localizada no município de Santa Luzia - PB e a Polimento de Granitos do Brasil S.A – POLIGRAN, localizada no município de Casserengue – PB. A mina da UBM encontra-se entre as principais, atualmente em produção, em termos nacionais, e a da POLIGRAN apresenta-se apenas como ocorrência.

No caso do minério de Santa Luzia, as amostras retiradas para os ensaios tecnológicos, consistiram de amostras de minérios extraídas diretamente na mina “r.o.m.”. Este era o minério que alimentava a usina de beneficiamento. Amostras do rejeito da usina foram também retiradas bem como dos produtos concentrados. No caso de Casserengue, o material foi coletado em poços de prospecção geológica, os quais foram abertos pela empresa. Em torno de 400 L de material, proveniente do minério de Santa Luzia e 250 L do minério de Casserengue, foram colocados em recipientes plásticos, etiquetados e transportados para a realização dos ensaios laboratoriais.

As amostras de minérios foram colocadas e espalhadas em lonas de plástico para serem secadas a temperatura ambiente, durante 2 dias. A seguir, as amostras foram homogeneizadas pelo método da pilha alongada e quarteadas em sub-amostras de 5 kg e 1 kg, respectivamente.

Com as amostras dos minérios (5 kg para cada teste) foram realizadas análises granulométricas, a úmido, com peneiras da série Tyler: 4 mm; 3,36 mm; 2 mm; 1 mm; 0,84 mm; 0,5 mm; 0,3 mm; 0,21 mm; 0,15 mm; 0,10 mm e 0,074 mm; utilizando-se um agitador mecânico de peneiras. Os ensaios foram efetuados com amostras de minério “r.o.m” e com amostras de minério britado, passadas no britador de rolos, a – 5 mm.

Com as amostras dos minérios “r.o.m” também foram realizados ensaios de separação por frações granulométricas, utilizando-se um agitador mecânico e peneiras da série Tyler. Foram obtidas 6 (seis) frações, a saber: (4-8) mm; (2,36-4) mm; (1-2,36) mm; (0,5-1) mm; (0,3-0,5) mm e (-0,3) mm. As primeiras 5 (cinco) frações foram submetidas a ensaios de esfoliação, e em seguida, o teor de vermiculita era determinado em cada uma das frações dos minérios.

### **3.2. Ensaios de Caracterização**

Algumas das frações granulométricas foram selecionadas para os ensaios de caracterização que consistiram de: difração de raios -X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV),

análise térmica diferencial (ATD) e termo gravimétrica (TG), fluorescência de raios-X (FRX) e ensaios de afunda/flutua para se determinar o teor de vermiculita, no minério e nos concentrados.

### **3.2.1. Difração de Raios-X**

Para este estudo, foram utilizados 2 g de amostra de cada um dos minérios e do concentrado de Santa Luzia, cominuídos a  $-0,074$  mm. No caso de Casserengue foram estudadas amostras provenientes da análise granulométrica do minério. Algumas das amostras foram obtidas através de catação manual visando separar a vermiculita em placas e as fases minerais a ela associadas. As condições experimentais dos ensaios foram efetuadas empregando-se um difratômetro Siemens com fonte de cobre e o valor de  $2\theta$  foi de  $1^\circ$  (um grau) por minuto. Os ensaios de difração de raios-X foram realizados nos laboratórios do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/RJ).

### **3.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura**

A caracterização das amostras de minérios e concentrados foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura Leica S440, acoplado com detetores de energia dispersiva de raios-x (EDS) e de elétrons secundários e retroespalhados, com feixe eletrônico de 20 KV e WD de 25 mm, sendo WD a distância de trabalho. As amostras após preparadas em lâminas foram metalizadas com ouro. Os estudos foram realizados nos laboratórios do CETEM/RJ.

### **3.2.3. Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termo gravimétrica (ATG)**

As análises de ATD e ATG foram realizadas empregando-se um analisador BPEng. modelo RB-3000, utilizando-se alumina como padrão, taxa de aquecimento de  $12,5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , atmosfera do ar, temperatura máxima de  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a granulometria das amostras de vermiculita foi de  $-0,074\text{ mm}$ . Os ensaios foram efetuados nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG.

### **3.2.4. Fluorescência de Raios-X**

Este método quantitativo de análise visou a determinação da composição química, como óxido do elemento, das vermiculitas usadas nos estudos tecnológicos. O equipamento utilizado foi um espectrômetro de Fluorescência de raios x, marca Philips, modelo PW – 2400. As análises de fluorescência de raios-X foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), localizada em Natal-RN. O material precisou ser cominuído a  $-0,074\text{ mm}$  e previamente as amostras foram submetidas à fusão em tetraborato de lítio.

### **3.3. Ensaio de Concentração**

Os ensaios de concentração, consistiram de submeter os minérios “r.o.m” à seguinte metodologia. Com as amostras do minério (1kg por teste) foram realizados peneiramentos, a seco com peneiras da série Tyler, nas seguintes aberturas:  $4\text{ mm}$ ;  $2,36\text{ mm}$ ;  $1,0\text{ mm}$ ;  $0,5\text{ mm}$  e  $0,3\text{ mm}$ ; colocadas em um agitador de peneiras tipo “Ro-tap”. Com as frações obtidas: (4-8)

mm; (2,36-4) mm; (1-2,36) mm; (0,5-1) mm; e (0,3-0,5) mm, foram realizados ensaios de concentração gravimétrica a úmido, em mesa oscilatória, onde as placas de vermiculita foram separadas dos outros minerais não lamelares, obtendo-se três produtos: concentrado, misto e rejeito.

Os produtos obtidos foram secados na estufa, e a seguir o misto da concentração gravimétrica foi submetido à separação magnética de alta intensidade a seco no separador Eriez modelo 20-A da INBRAS. Neste processo foram coletados três produtos: magnético, não magnético e misto. O produto misto era repassado três vezes. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da Coordenação de Tratamento de Minérios do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT. Com os concentrados obtidos foram efetuados ensaios de esfoliação para se determinar o teor de vermiculita.

### **3.4. Ensaio de Esfoliação**

Os ensaios de esfoliação foram realizados com amostras de concentrados de vermiculita de Santa Luzia em diferentes frações granulométricas e com amostras dos minérios de Santa Luzia e de Casserengue, separados por faixas granulométricas. Os testes foram efetuados empregando-se um forno mufla marca Quimis, modelo Q – 318D24 de 4000 W, com termopar de NiCrNi e controlador digital de temperatura.

O material, 50 g por teste, era subdividido em 5 frações de 10 g e colocado em um cadinho de aço inoxidável durante um determinado tempo e temperatura. As dimensões dos cadinhos foram de 15x10x2,5 cm e eram providos de uma haste de 50 cm de comprimento, cuja função era de agitação do material dentro da câmara e com isso garantir que todas as partículas sejam aquecidas e sujeitas a um regime de turbulência. Na FIGURA 3.1, observam-se detalhes da mufla e acessórios utilizados na realização de um ensaio de esfoliação.



**FIGURA 3.1** - Detalhes da mufla e acessórios utilizados na realização de um ensaio de esfoliação de vermiculita.

O material esfoliado era coletado em recipientes de alumínio e o mesmo era analisado quanto ao teor de vermiculita, massa específica aparente (MEA), e rendimento volumétrico de esfoliação ( $\eta$ ). A determinação desses índices foi efetuada com base nas metodologias

secado na estufa a uma temperatura de 60 °C e em seguida foi pesado. Na FIGURA 3.3, observa-se uma vista de cima do funil durante a realização de um ensaio de afunda e flutua.



**FIGURA 3.3** – Detalhes do funil no ensaio de determinação do teor de vermiculita.

O teor de vermiculita foi determinado através da seguinte relação.

$$\% \text{ Vermiculita} = \frac{\text{Massa da amostra (g)} - \text{Massa do material afundado (g)}}{\text{Massa total da amostra (g)}} \times 100 \quad (3.3)$$

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos seguintes estão apresentados os resultados obtidos durante o estudo e as respectivas discussões.

#### 4.1. Caracterização

##### 4.1.1. Difração de Raios-X

No minério de vermiculita de Santa Luzia, os minerais identificados qualitativamente em cada uma das frações granulométricas estudadas através de difração de raios-X, encontram-se apresentados na TABELA 4.1.

Nessa tabela, o número de asteriscos representa a proporção do mineral, sendo que para a espécie predominante foram utilizados 4 asteriscos (\*\*\*\*), quando o mineral não era predominante mas encontrava-se em proporções apreciáveis, utilizou-se a simbologia (\*\*\*), quando o mineral encontrava-se em menor proporção (\*\*), e quando o mineral encontrava-se apenas em pequena proporção utiliza-se a simbologia (\*).



No minério de vermiculita de Santa Luzia foram identificados os flossilicatos: vermiculita como mineral principal, hidrobiotita, biotita, talco e serpentina. O piroxênio detectado foi o diopsídio. Entre os anfibólios, a honblenda. Nessa amostra também foram identificados o feldspato microclínio e os carbonatos: calcita e dolomita. Existem também pequenas proporções de óxidos de ferro: goethita.

**TABELA 4.1** - Minerais identificados qualitativamente por DRX em cada uma das frações granulométricas selecionadas do minério de Santa Luzia.

| MINERAL      | FAIXA GRANULOMÉTRICA, MM |              |              |              |              |        |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|
|              | -1,168+0,833             | -0,833+0,500 | -0,500+0,295 | -0,147+0.104 | -0.104+0,074 | -0,074 |
| Vermiculita  | ****                     | n.a          | ****         | ****         | ****         | ****   |
| Hidrobiotita | **                       | n.a          | **           | **           | **           | **     |
| Diopsídio    | nd                       | n.a          | *            | *            | nd           | nd     |
| Honblenda    | ***                      | n.a          | **           | **           | **           | **     |
| Calcita      | *                        | n.a          | nd           | *            | *            | **     |
| Dolomita     | **                       | n.a          | **           | **           | **           | **     |
| Microclínio  | *                        | n.a          | **           | *            | nd           | nd     |
| Serpentina   | *                        | n.a          | *            | *            | *            | *      |
| Biotita      | *                        | n.a          | *            | *            | *            | *      |
| Talco        | nd                       | n.a          | *            | *            | *            | *      |
| Goethita     | *                        | n.a          | *            | nd           | nd           | nd     |

n.a = não analisada;

n.d = não detectado.

Os difratogramas obtidos com amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e minério de Casserengue encontram-se apresentados nas FIGURAS 4.1 e 4.2, respectivamente. Na vermiculita de Santa Luzia a amostra estudada foi obtida, a partir de produtos comerciais processados na usina de beneficiamento, no caso, da fração Grande, onde as placas de vermiculita

foram selecionadas por catação. No minério de Casserengue, a amostra estudada foi obtida, a partir do material "r.o.m" que foi separada por peneiramento a úmido e correspondeu à fração (-0,208 + 0,147) mm.

O difratograma apresentado na FIGURA.4.1, apresenta os picos característicos da vermiculita, nas seguintes posições:  $2\theta = 5,99$  (14,70 Å);  $2\theta = 18,41$  (4,82 Å);  $2\theta = 24,82$  (3,62 Å);  $2\theta = 30,97$  (2,89 Å);  $2\theta = 37,56$  (2,39 Å);  $2\theta = 60,11$  (1,53 Å);  $2\theta = 64,44$  (1,45 Å). O valor de  $2\theta$  corresponde ao ângulo de Bragg e o valor entre parênteses refere-se à distância interplanar. A vermiculita apresenta uma reflexão basal localizada na posição  $2\theta = 5,99$  (14,70 Å).

No estudo de Leitão (2003), também foram analisadas por DRX amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia. Um aspecto interessante que pode ser ressaltado nesse trabalho é que o difratograma apresentava um pico localizado na posição  $2\theta = 6,90$  (12,98 Å). Este pico foi interpretado como sendo devido à presença de biotita ou à interstratificação de vermiculita+biotita. O resultado mencionado por Leitão (2003) confirmaria outros trabalhos realizados por Hennies e Stellin (1976), Assunção (1985), Machado (2000) e Martins et al. (2001).

Na FIGURA 4.2, é apresentado o difratograma de DRX de uma amostra de minério de Casserengue. Conforme é observado, a amostra possui uma variabilidade mineralógica, havendo sido identificados os filossilicatos: biotita, vermiculita e ilita, sendo que a espécie predominante é a biotita. Entre os feldspatos foi detectada a presença de albita, que é um feldspato do tipo sódico.

Entre os anfibólios foi detectada actinolita. Este mineral é semelhante à tremolita; porém, quando o teor de ferro é maior que 2 % denomina-se actinolita. (Dana-Hurlbut, 1981).

Esta técnica de caracterização foi pouco usada no estudo do minério de Casserengue, dada a diversidade mineralógica da mesma, já que uma excessiva sobreposição de picos impediu uma melhor identificação dos minerais. Outras frações granulométricas foram estudadas através do MEV e os resultados estão apresentados na figura 4.1 na página seguinte.

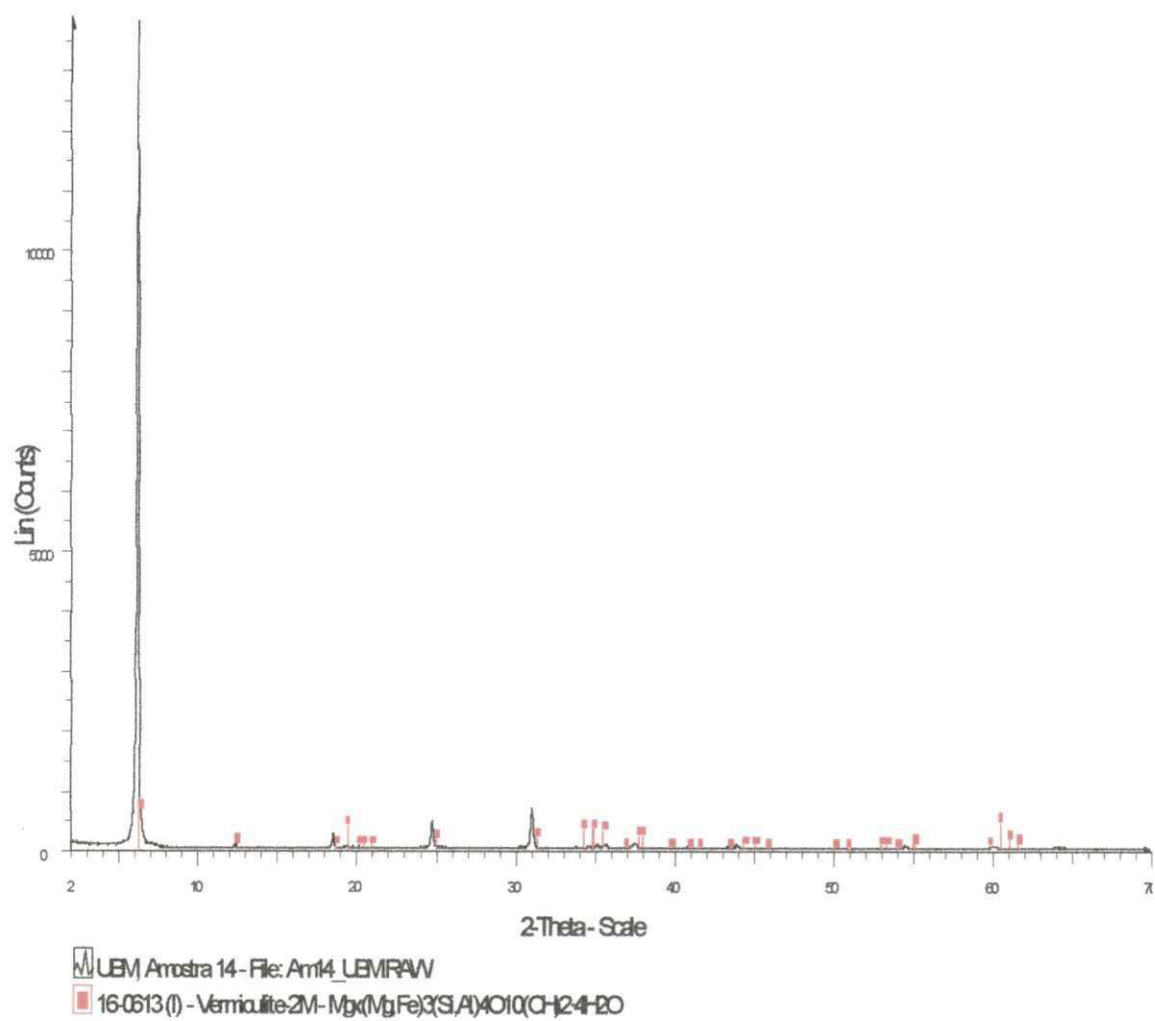
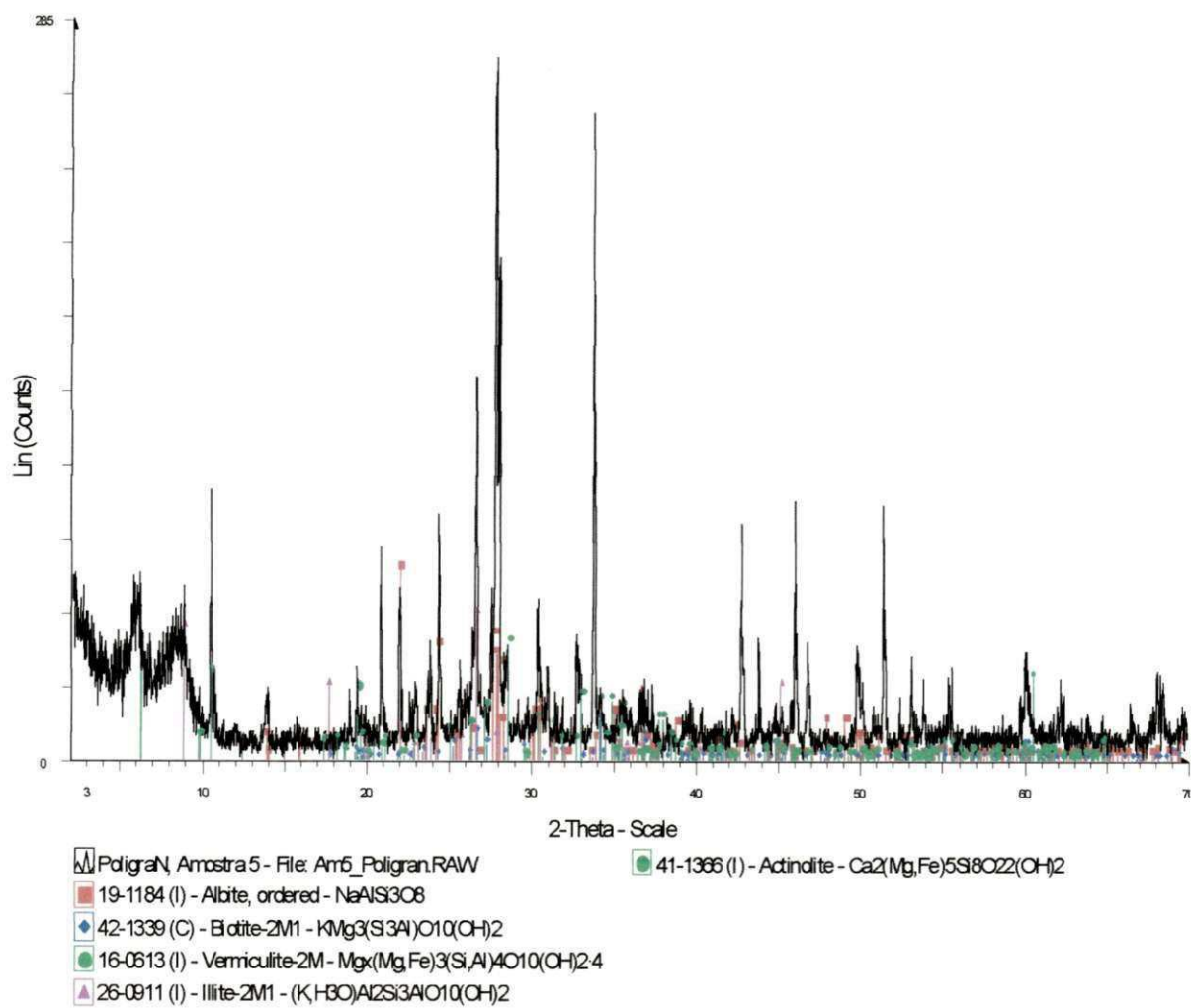


FIGURA 4.1 - Difratoograma de uma amostra de concentrado vermiculita de Santa Luzia.



**FIGURA 4.2** - Difratoograma de uma amostra do minério de Casserengue.

#### 4.1.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura

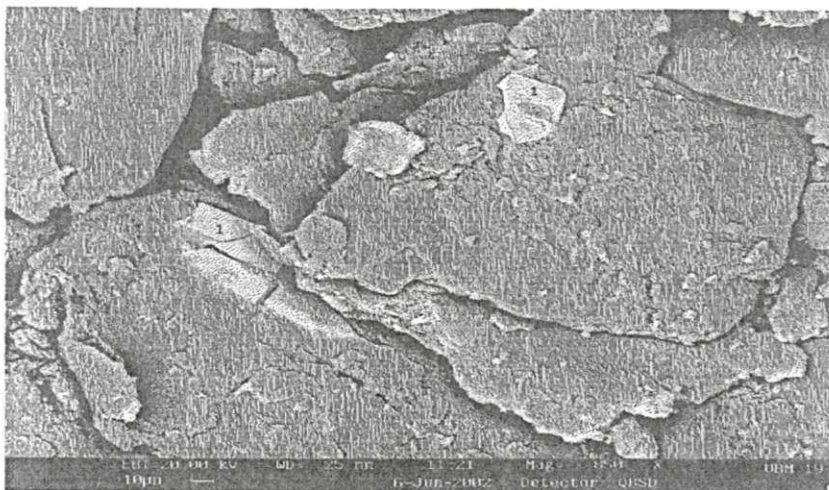
As FIGURAS 4.3 e 4.4, apresentam as micrografias pertencentes a concentrados de vermiculita de Santa Luzia. Observa-se na FIGURA 4.3 que, as placas de vermiculita apresentam superfícies em elevado grau de alteração e pouca uniformidade mineralógica. Verificou-se freqüentemente as placas compondo estruturas semelhantes a agregados. Essa denominação de mica em agregados foi dada devido à textura das placas, que apresentam marcados estados de alteração mineralógica.

Segundo De la Calle e Suquet, citados por Machado (2000), o processo de alteração ocorre na seqüência de transformação seguinte: mica (biotita ou flogopita) → vermiculita → esmectita. No caso de jazida de Santa Luzia, a vermiculita co-existiria simultaneamente com as outras fases existentes, ou seja, haveria vermiculita pura, vermiculita associada com biotita, biotita pura, vermiculita transformando-se para esmectita, e esmectita pura. Outra característica do mineral é que apresenta grande quantidade de finos (FIGURA 4.4), provavelmente, por ser muito friável e possuir uma textura pouco uniforme.

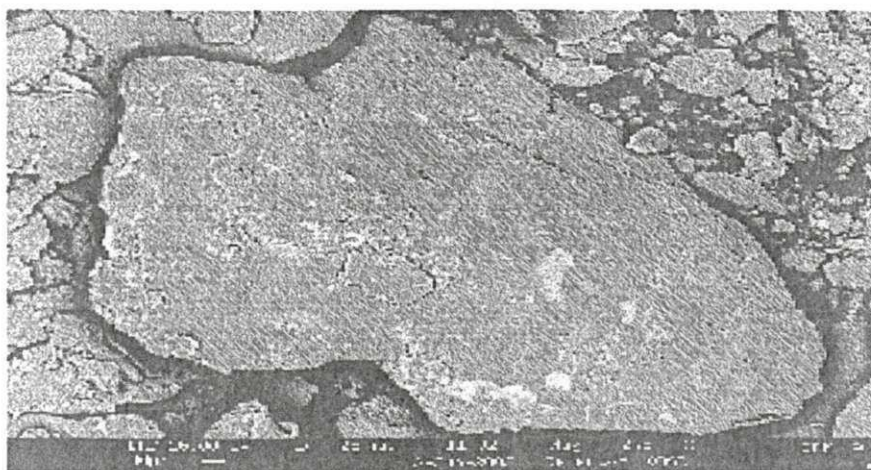
Nas FIGURAS 4.3 e 4.4, mostram-se detalhes de placas de vermiculita e sua associação com espinélio (fase mais clara na micrografia). Este mineral ocorre constituindo depósitos e cristais; porém em concentração provavelmente pequenas. A FIGURA 4.5 apresenta o espectro de EDS de uma partícula de espinélio e os resultados, indicaram tratar-se de um espinélio, contendo ferro, cromo e oxigênio. O estudo realizado por Assunção (1985) com amostras de diferentes procedências do estado da Paraíba, entre elas de Santa Luzia, determinou o teor

de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  através de absorção atômica e encontrou teores na faixa de 0,13 % a 0,22 %. Devido aos baixos teores de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  no mineral, este não representa problemas às propriedades de piroexpansão da vermiculita, conforme será visto no tópico esfoliação, deste trabalho.

A FIGURA 4.6, apresenta a micrografia pertencente ao minério de Casserengue, correspondente à fração (- 0,208+0,147) mm. Observa-se que as partículas são constituídas por diversas espécies minerais, entre as quais foram detectadas: biotita, feldspato, e fayalita. Entre os minerais encontrados, a biotita, aparece em maior proporção, em relação a vermiculita. Este mineral, em geral, ocorre em menor quantidade, sendo que a maioria das partículas de mica, na verdade, são de biotita.

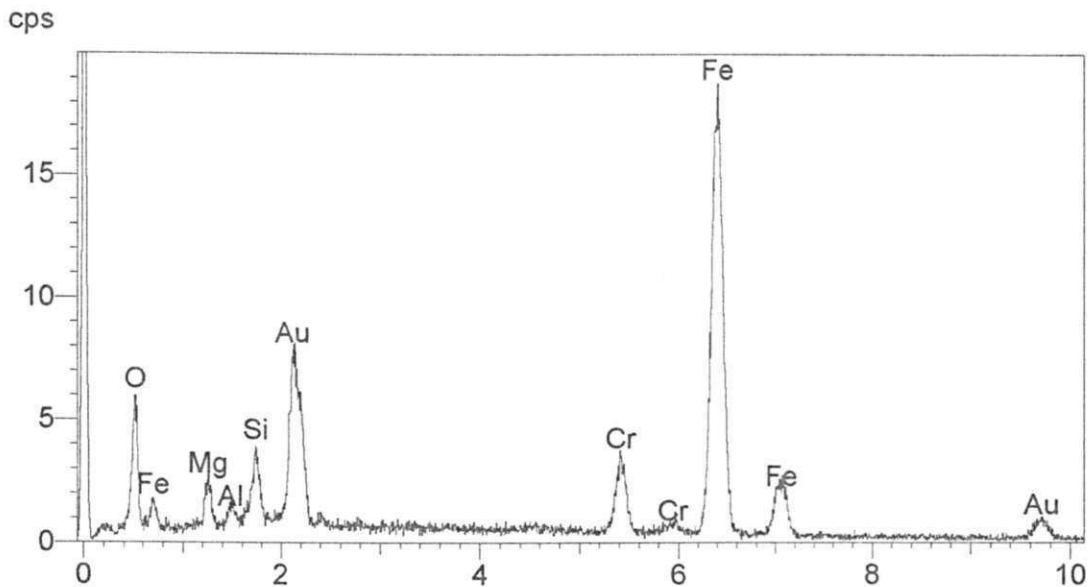


**FIGURA 4.3** – Micrografia mostrando a morfologia e textura da Amostra de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e sua associação com espinélio (fase mais clara). Aumento:850x.



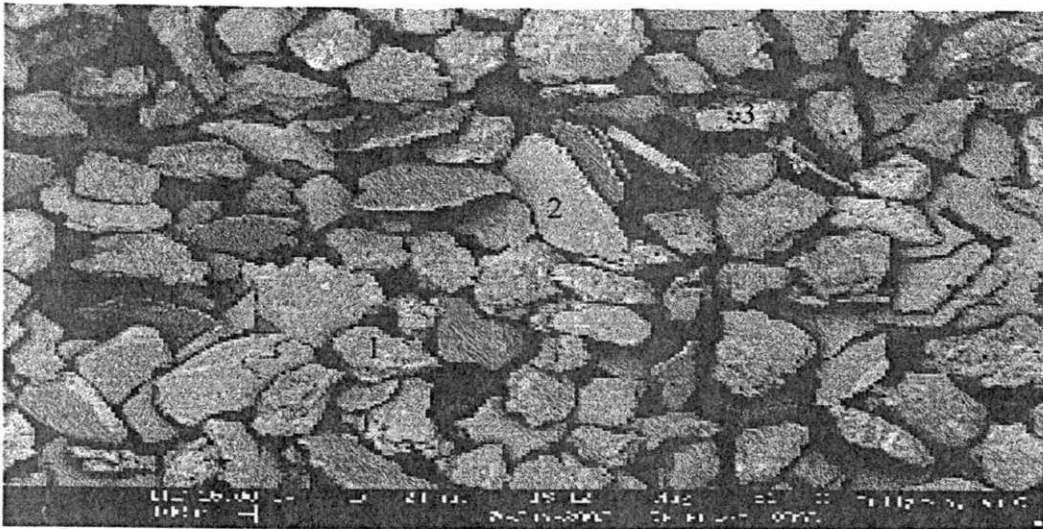
**FIGURA 4.4** – Micrografia de uma placa de vermiculita de Santa Luzia, mostrando detalhes das inclusões de espinélio (parte mais clara). Aumento: 275x.



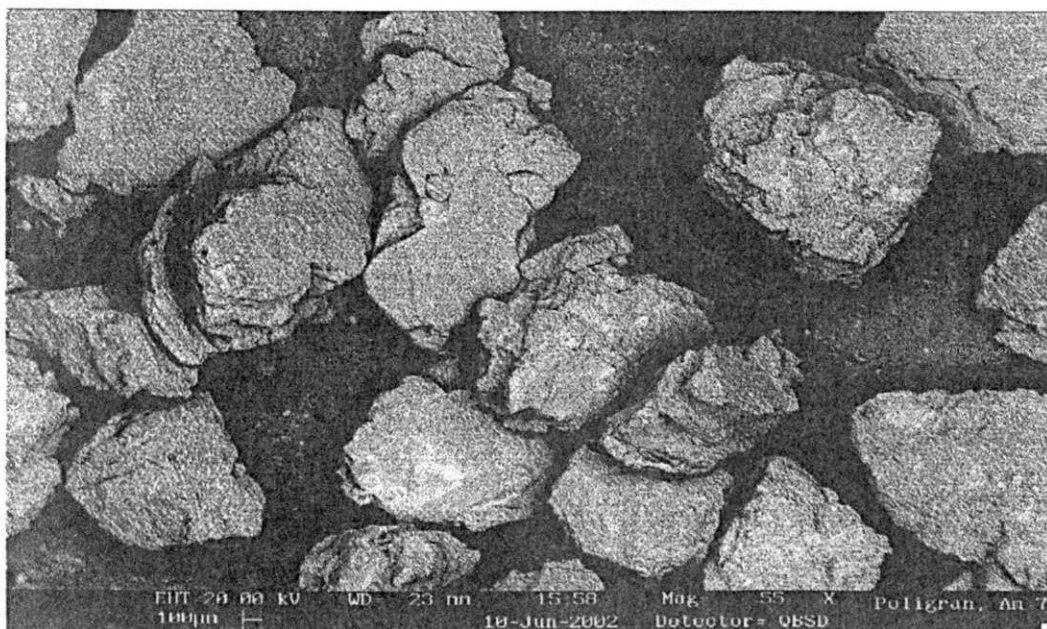


**FIGURA 4.5** – Espectro EDS correspondente a uma partícula de espinélio (Fe-Cr) inclusa na vermiculita (parte mais claro na micrografia).

Na FIGURA 4.6, observa-se uma partícula de biotita, assinalada no centro da micrografia com o número 2. O feldspato aparece com o número 1 e a fayalita com o número 3. Foi verificado que a biotita se diferencia da vermiculita em dois aspectos: (a) em termos de textura, a biotita, preserva suas características decorrentes de sua origem primária, que se manifesta através de uma superfície isenta da ação intempérica; (b) na morfologia, a biotita apresentava-se em placas muito mais definidas, e também em massas irregulares e laminadas, conforme é mostrado na FIGURA 4.7.



**FIGURA 4.6** – Micrografia da amostra do minério de Casserengue. O ponto 1 indica uma partícula de feldspato. O ponto 2 representa uma placa de mica biotita e o ponto 3 indica provavelmente uma partícula de fayalita. Aumento: 56x.



**FIGURA. 4.7** – Micrografia da amostra do minério de Casserengue, mostrando partículas de mica biotita. Aumento: 55x.

Nas FIGURAS 4.8, 4.9 e 4.10, apresentam-se os espectros de EDS correspondentes às partículas de biotita, feldspato e fayalita, respectivamente. Observa-se no EDS da FIGURA 4.8, que a biotita é constituída, além do silício, alumínio e oxigênio, também por ferro e potássio. Estes elementos, normalmente, apresentam-se em concentrações muito maiores na biotita do que na vermiculita. A presença do K é marcante na biotita, especialmente quando esse elemento encontra-se em teores acima de 2,5% (Machado, 2000). Nos estudos de FRX, citados nos seguintes tópicos, foi determinado que em uma amostra de minério de Casserengue, o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foi de 13,45 % e o de  $\text{K}_2\text{O}$  foi de 2,30 %. Estes teores foram maiores que os encontrados para amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia.

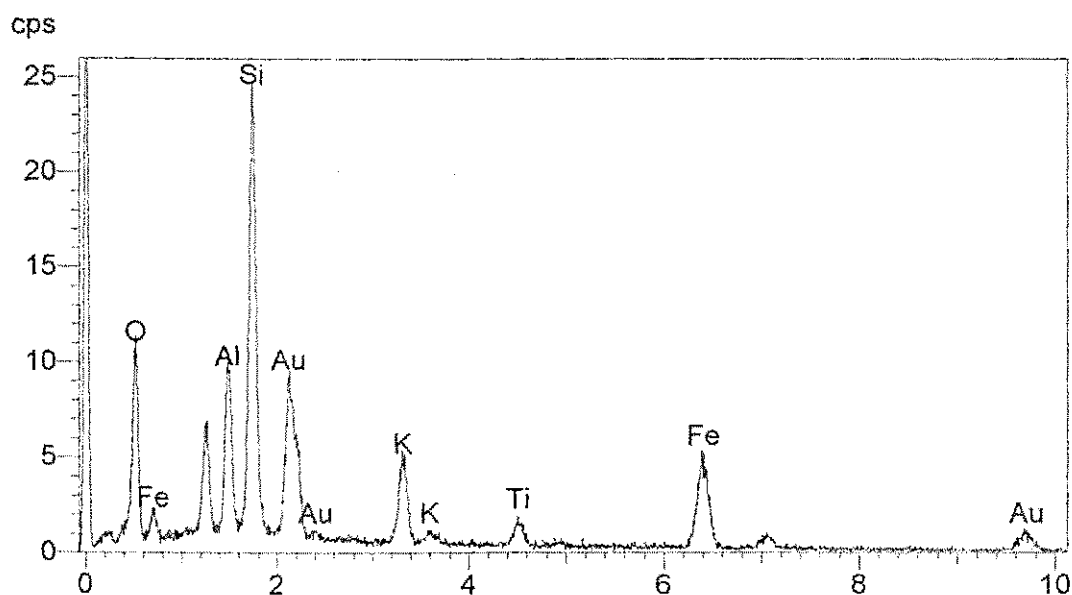


FIGURA 4.8 - Espectro EDS de uma partícula de mica biotita (Ponto 2).

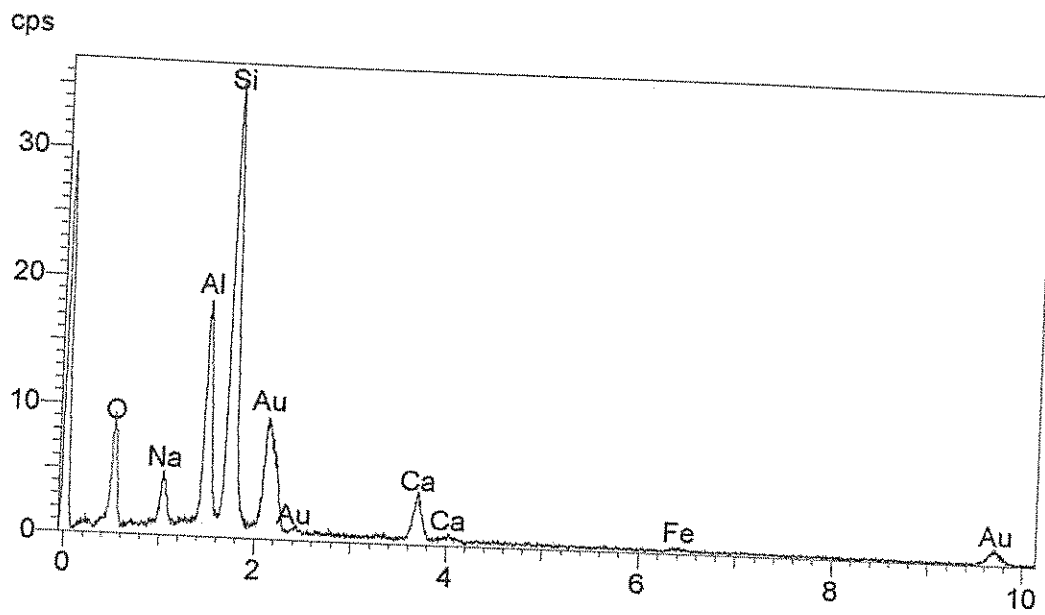


FIGURA 4.9 - Espectro EDS de uma partícula de feldspato da série albite-anortita (Ponto 1).

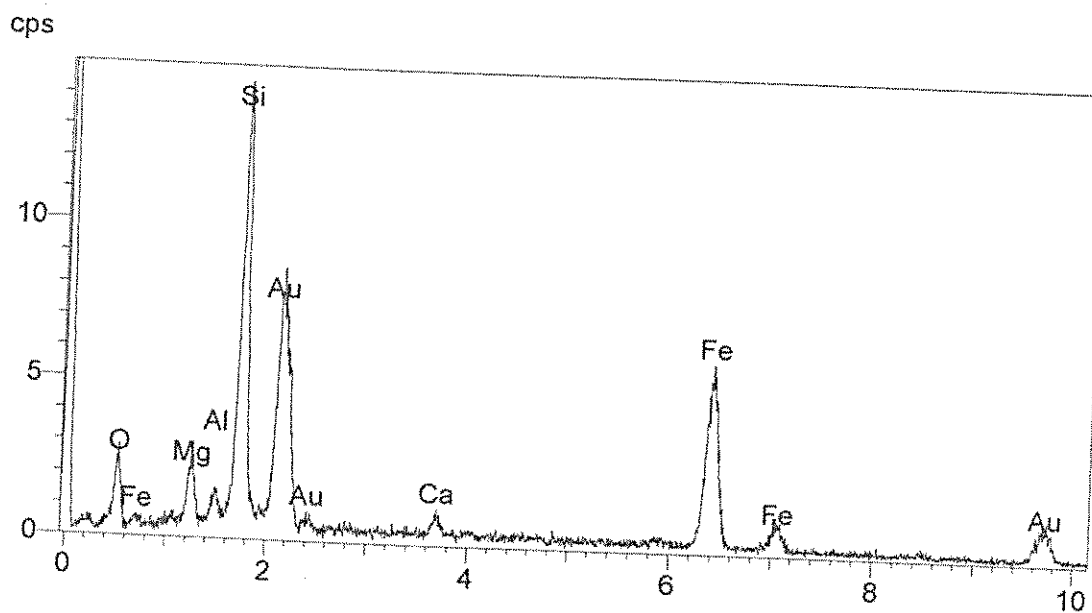


FIGURA 4.10 - Espectro EDS de uma partícula provavelmente de fayalita (Ponto 3).

### 4.1.3 Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica

Na FIGURA 4.11, estão apresentados os resultados de ATD e TG. As curvas de ATD e TG apresentam um comportamento muito semelhante da vermiculita de Santa Luzia com a vermiculita do Piauí da Eucatex (Valdiviezo et al., 2002). Os dois principais picos endotérmicos aparecem nas temperaturas de 200 e 300 °C, onde o primeiro é mais pronunciado que o segundo. Pequenas variações das curvas ATD foram observadas, em termos de intensidade e posição dos picos, entre 0 e 150 °C. O primeiro pico, que aparece com um mínimo muito acentuado a 200 °C, representa a remoção de água adsorvida por higroscopia que se encontraria no espaço interlamelar. O segundo pico, em torno de 300 °C, indicaria a transição da camada de água para uma fase anidra (Machado, 2000; Assunção, 1985).

A perda de massa, referentes à evaporação de água que gerou um pico endotérmico com um mínimo em 200 °C, foi de aproximadamente 12 % para a amostra de Santa Luzia. Grim, citado por Machado (2000), menciona que a intensidade desses picos está diretamente relacionada à quantidade de água contida na amostra e por sua vez a quantidade dessa água depende da composição mineralógica das mesmas.

A variação da massa, na faixa de temperatura entre 300 e 800 °C, foi de aproximadamente 5 % para a amostra. A amostra de vermiculita de Santa Luzia apresenta um pico endotérmico a 830 °C, caracterizando um processo de desidroxilação. A curva de ATD apresenta um pico exotérmico a 840 °C. Acima desta temperatura, a decomposição térmica restringe-se à

recristalização de uma nova fase mineralógica, com a destruição da anterior e perda de toda a água de desidroxilação. Esta fase mineral é a enstatita, que também foi confirmada através de DRX por outros autores (Machado, 2000; Martins et al., 2001; Lowell, 1977). A variação exotérmica apresentada por esta vermiculita entre a temperatura de 340 e 800 °C, onde se verificou uma ascensão da curva de ATD, e pode ser interpretada como sendo devida à oxidação do ferro  $Fe^{2+}$  em  $Fe^{3+}$  (Mackenzie, 1957).

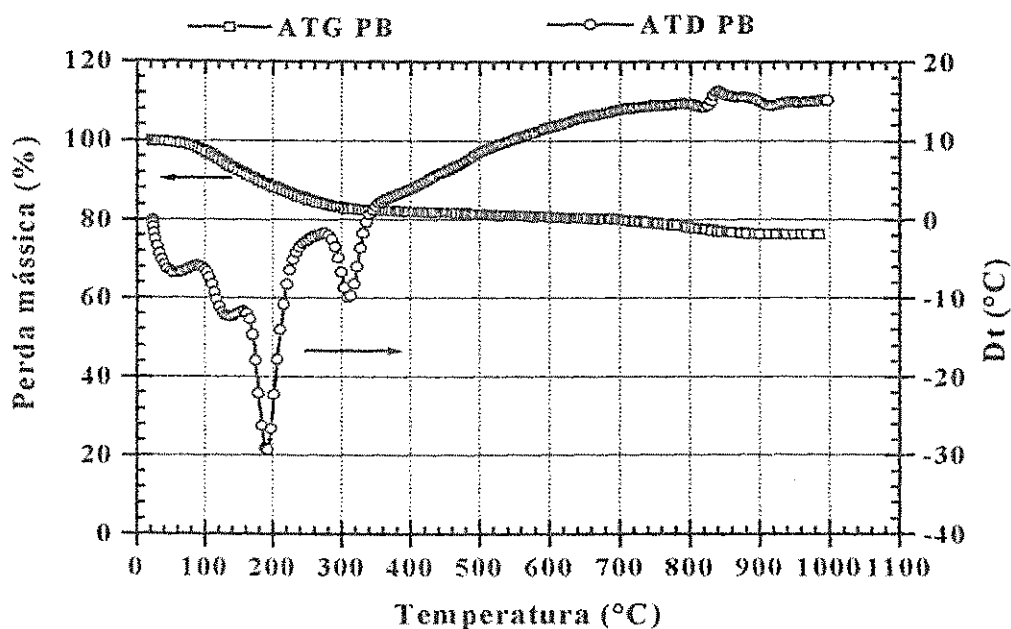


FIGURA 4.11 – Curvas de ATD e TG de amostras de concentrados de vermiculita de Santa Luzia.

Na FIGURA 4.12, mostram-se os resultados de ATD e TG da amostra de Casserengue, correspondente a fração (-0,295 + 0,208) mm obtida através de peneiramento a úmido. É importante mencionar que nesta amostra, a biotita aparece como espécie predominante, acompanhada de outros minerais como fedspato e olivina, os quais aparecem em menor

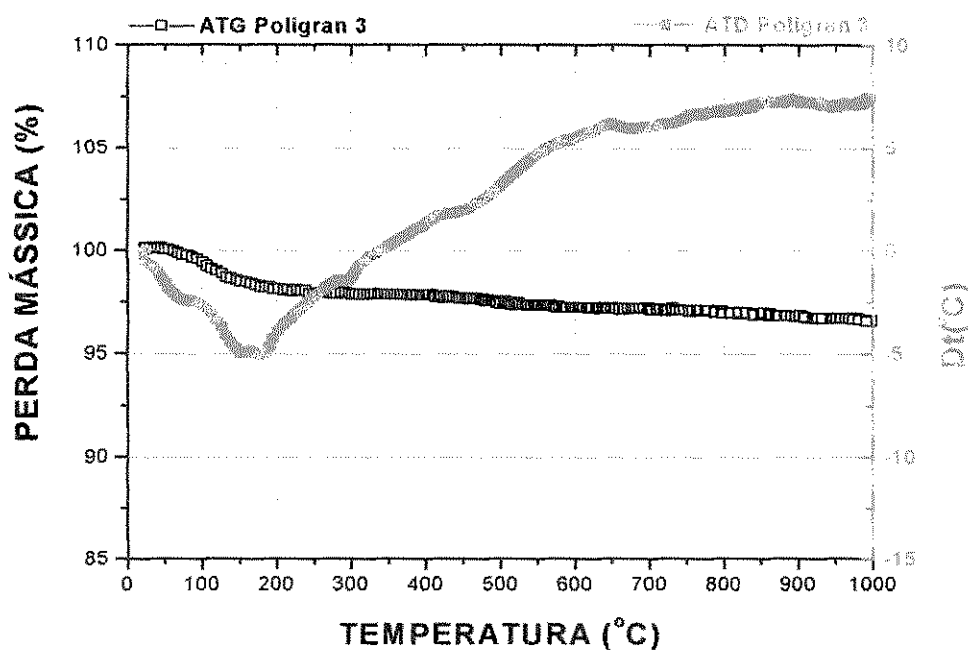
proporção. Neste caso, as curvas de ATD e TG obtidas não corresponderiam apenas à biotita. Observa-se na curva de ATD um pico endotérmico com um mínimo entre 150 e 200 °C. Este pico deve sua origem à perda de água higroscópica. Segundo Mackenzie (1957) este é um comportamento típico na maioria das micas minerais. Em algumas micas, como a moscovita, este pico endotérmico não aparece na curva de ATD.

O tamanho e forma deste pico está relacionado, entre outros fatores, à quantidade de água presente no espaço interlamelar e à composição química (Mackenzie, 1957). Este pico é menos acentuado em comparação ao pico observado para a amostra de Santa Luzia (FIGURA 4.11). Esta diferença deve-se a que o teor de água na amostra de Casserengue é bem menor que o de Santa Luzia. A 300 °C a perda de massa na amostra de Santa Luzia foi de aproximadamente 18 %. Enquanto que na amostra de Casserengue foi de apenas 2 %.

Um aspecto interessante a ser ressaltado é que, nesta amostra, foi observado um segundo pico endotérmico, embora pouco expressivo. Este pico, normalmente ocorre, em torno, de 300 °C e representa as reações de desidroxilação que acontecem devido a remoção da água estrutural ou de grupos hidroxilados. A isenção deste pico deve-se, provavelmente, a que nesta amostra, a mica biotita não dispõe de uma significativa presença de grupos hidroxilas na sua estrutura.

A partir de 300 °C e até 800 °C, foi observada uma ascensão da curva de ATD. Esta variação exotérmica apresentada pela amostra foi interpretada como sendo devida à oxidação do

ferro  $Fe^{2+}$  em  $Fe^{3+}$  (Mackenzie, 1957). Um comportamento similar foi verificado para a amostra de Santa Luzia (Leitão, 2003).



**FIGURA 4.12** - Curvas ATD e TG da amostra de Casserengue, correspondente à fração (-0,295 + 0,208) mm do minério "r.o.m." A sigla Poligran 3 foi usada para fins de identificação.

#### 4.1.4- Fluorescência de Raios-X

Os resultados de FRX obtidos para as amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e minério de Casserengue encontram-se apresentados na TABELA 4.2. Na amostra de Casserengue, foi selecionada a fração (-0,295+ 0,208) mm que foi obtida através de peneiramento a úmido do minério "r.o.m".



**TABELA 4.2** – Resultados de análise química por FRX de amostras de vermiculita de Santa Luzia e Casserengue.

| AMOSTRA     | TEOR (%)         |                                |       |      |                  |                                |                  |      |                               |                   |       |       |
|-------------|------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|--------------------------------|------------------|------|-------------------------------|-------------------|-------|-------|
|             | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO   | CaO  | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | MnO  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Na <sub>2</sub> O | P.F.  | TOTAL |
| Santa Luzia | 39,43            | 10,95                          | 25,73 | 0,51 | 0,39             | 9,89                           | 0,77             | 0,09 | 0,03                          | n.d.              | 12,09 | 99,88 |
| Casserengue | 51,99            | 16,70                          | 4,33  | 5,24 | 2,30             | 13,45                          | 2,57             | 0,18 | 0,21                          | 3,23              | 0,78  | 99,98 |

n.d. = não detectado;

P.F. = Perda ao fogo a 950 °C;

Limite de detecção = 0,01%.

Na TABELA 4.3, encontram-se as faixas de composição química para vermiculitas comerciais.

**TABELA 4.3** – Faixas de composição química de vermiculita comercial típica.

| SiO <sub>2</sub> % | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | MgO%  | CaO% | K <sub>2</sub> O% | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | TiO <sub>2</sub> % | P.F.% | OUTROS % |
|--------------------|----------------------------------|-------|------|-------------------|----------------------------------|--------------------|-------|----------|
| 38-46              | 10-16                            | 16-35 | 1-5  | 1-6               | 6-13                             | 1-3                | 8-16  | 0,2-1,2  |

Fonte: The Vermiculite Association, 2002.

Conforme observa-se a TABELA 4.2, os teores dos elementos principais da composição química da amostra de Santa Luzia que são: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, H<sub>2</sub>O e outros voláteis, encontram-se dentro dos valores atribuídos às vermiculitas comerciais (TABELA 4.3). Os outros teores, como K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> e CaO, apresentam valores ligeiramente inferiores aos valores comerciais; porém, devido às baixas concentrações em que eles se apresentam, não afetam a qualidade do produto esfoliado de vermiculita. Em termos de composição química, a vermiculita de Santa Luzia é muito semelhante à de Phalabora em comparação a outras vermiculitas brasileiras. (www.vermiculite.org, 2002).

No caso da amostra de Casserengue, a pesar da análise não corresponder a um mineral, senão a uma fração granulométrica, no qual há outros minerais, a composição química mostrada na TABELA 4.2, apresentou mais semelhança com a da biotita do que com a da vermiculita. Esta observação é assinalada em função de outros resultados obtidos e também pelos maiores teores de  $\text{FeO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e baixo teor de P.F. encontrados nesta amostra.

Por outro lado, os resultados do MEV mostraram que esta amostra é constituída por biotita, como sendo a espécie predominante, seguida de alguns feldspatos e olivina e onde não foi detectada vermiculita.

#### 4.1.5 - Capacidade de Troca Catiônica

Na TABELA 4.4, estão apresentados os resultados de CTC obtidos para amostras de vermiculita de Santa Luzia e de Casserengue. Nesta última, foi utilizada para os ensaios a fração  $(-0,208+0,074)$  mm do minério "r.o.m" obtido através de peneiramento a úmido. A CTC foi dada em meq (miliequivalentes) por 100g de amostra. Por exigência da metodologia utilizada, todas as amostras foram cominuidas a uma granulometria a  $-0,147$  mm.

TABELA 4.4 – Capacidade de troca catiônica das amostras de Santa Luzia e Casserengue.

| CÁTIONS         | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Al <sup>3+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | H <sup>+</sup> | TOTAL  |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|--------|
| CTC Santa Luzia | 18,25            | 97,24            | 0,15             | 2,02            | 1,60           | n.d            | 118,62 |
| CTC Casserengue | 4,37             | 1,75             | 0,00             | 0,31            | 0,13           | 1,59           | 8,15   |

n.d. = não analisado.

Conforme pode ser observado nesta tabela, a CTC total foi de 118,62 para a amostra de Santa Luzia e de apenas 8,15 meq por 100g de amostra para o material de Casserengue. Para a amostra de Santa Luzia, este valor encontra-se na faixa citada em outros trabalhos, que foi de 50 a 250 meq por 100g de amostra. (Santos, 1992; Santos e navajas, 1981; Assunção, 1985).

A CTC da amostra de Santa Luzia a pesar de encontrar-se abaixo do valor encontrado na literatura (Assunção, 1985; Castro, 1996) pode ser considerada aceitável. Esta variação, deve-se provavelmente, entre outros fatores, à pureza das vermiculitas, método usado na determinação da CTC e à granulometria. As capacidades de troca para os cátions Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, para esta amostra, encontra-se dentro dos valores normais.

Com relação à amostra de Casserengue, foi verificado um valor de CTC, muito pequeno e bastante inferior ao concentrado para a amostra de Santa Luzia. Este baixo valor de CTC, deve-se entre outros fatores, à estrutura cristalina da biotita que limitou o conteúdo de água e a conseqüente fixação de cátions no espaço interlamelar (Santos, 1992). A soma de ambos os valores correspondem a mais de 90 % de CTC do mineral.

## 4.2 – Concentração

### 4.2.1. Classificação Granulométrica

Na TABELA 4.5 apresentam-se os resultados da análise granulométrica, a úmido, dos minérios de vermiculita “r.o.m” de Santa Luzia e de Casserengue. Nessa tabela podemos observar que, o percentual total passante na fração (-0,5+0,3) mm para ambos os minérios foi de 31,6 % e 24,1 %, respectivamente, e o material retido cumulativo nesta faixa foi de 68,4 % (Santa Luzia) e de 75,9 % (Casserengue). Como os produtos comerciais de vermiculita (Grande, Médio, Fino, Superfino e Microfino) são obtidos com a fração maior que 0,3 mm; o minério de Santa Luzia apresentaria, em termos percentuais, menor massa (68,4 %) a ser beneficiada, em relação ao minério de Casserengue (75,9 %), sem considerar as perdas que decorreriam durante o manuseio e transporte, devido à fragilidade do mineral.

**TABELA 4.5** - Análise granulométrica a úmido dos minérios de vermiculita “r.o.m”. Massa total de amostra = 5,0 kg, britado a - 5 mm (Santa Luzia) e “tal qual” (Casserengue).

| GRANULOMETRIA<br>mm | MINÉRIO DE SANTA LUZIA |            | MINÉRIO DE CASSERENGUE |            |
|---------------------|------------------------|------------|------------------------|------------|
|                     | % Retido               | % Passante | % Retido               | % Passante |
| +4,69               | 8,6                    | 91,4       | 2,9                    | 97,1       |
| -4,69+2,36          | 1,8                    | 89,6       | 4,1                    | 93,0       |
| -2,36+1,65          | 9,3                    | 80,3       | 8,1                    | 84,9       |
| -1,65+1,16          | 10,1                   | 70,2       | 13,1                   | 71,8       |
| -1,16+0,83          | 10,5                   | 59,7       | 12,0                   | 59,8       |
| -0,83+0,50          | 17,3                   | 42,4       | 20,7                   | 39,1       |
| -0,50+0,30          | 10,8                   | 31,6       | 15,0                   | 24,1       |
| -0,30+0,21          | 5,3                    | 26,3       | 6,9                    | 17,2       |
| -0,21+0,15          | 5,0                    | 21,3       | 5,1                    | 12,1       |
| -0,15+0,10          | 2,4                    | 18,9       | 2,5                    | 9,6        |
| -0,10+0,074         | 2,3                    | 16,6       | 2,1                    | 7,5        |
| -0,074              | 16,6                   | 00,0       | 7,4                    | 0,0        |
| Total               | 100,0                  | ---        | 100,0                  | ---        |

Ensaio realizado em duplicata.

Conforme pode ser observado nessa tabela, para ambas as amostras, o material distribuiu-se preferencialmente na granulometria compreendida entre  $(-2,26+0,3)$  mm, que representaria 58 % (Santa Luzia) e 69,0 % (Casserengue) da massa total. Por outro lado, o material distribuído na fração menor que 0.074 mm, para ambos os minérios, apresentaram valores percentuais, considerados normais. Quando esta percentagem é alta, recomenda-se que previamente ao beneficiamento o material seja lavado ou classificado, a fim de separar esta fração e posteriormente secado (Castro, 1996).

Na TABELA 4.6 apresentam-se os resultados da percentagem em massa retida e teor de vermiculita em cada uma das seis frações granulométricas obtidas a partir dos minérios "r.o.m" de Santa Luzia e Casserengue. A peneira com abertura de 2,36 mm, foi escolhida ao invés da peneira de 2,0 mm, por causa da indisponibilidade desta última. Essa tabela mostra que para ambos minérios a maior distribuição do material encontra-se nas granulometrias  $(-2,36+1,0)$  mm,  $(-1,0+0,5)$  mm e  $(-0,5+0,3)$  mm. Porém, nestas frações e nas outras quatro, o teor de vermiculita foi significativamente maior nas amostras de Santa Luzia. Nas granulométrias de  $(-1,0+0,5)$  mm e  $(-0,5+0,3)$  mm os teores de vermiculita foram de 39,1 % e 45 %, respectivamente, para a amostra de Santa Luzia. Enquanto, o material de Casserengue, apresentou, nestas frações, teores de 9,2 % e 6,3 %, respectivamente.

Para o minério de Santa Luzia, observou-se um aumento do teor de vermiculita com a diminuição da granulometria. Conforme observado na Tabela, o teor de vermiculita nas granulometrias mais nobres (Grande e Média), é inferior que a vermiculita nas granulometrias

menores (Fina, Superfina e Microfina). Verificou-se também que o teor de vermiculita nas frações as quais foram separadas do minério de Casserengue, não representam condições favoráveis para o processamento deste material. Castro (1996) e Hindman (1994), apontam que minérios com teores inferiores a 15 % de vermiculita, não são considerados economicamente viáveis para o seu aproveitamento industrial.

**TABELA 4.6** - Distribuição em massa (% retido) e teor de vermiculita dos minérios "r.o.m" separados em 6 frações granulométricas. Massa de mostra = 1,0 kg. Peneiramento no Ro-tap a seco.

| GRANULOMETRIA<br>mm | MINÉRIO DE SANTA<br>LUZIA |         | MINÉRIO DE CASSERENGUE |         |
|---------------------|---------------------------|---------|------------------------|---------|
|                     | % Retido                  | Teor, % | % Retido               | Teor, % |
| -8,0+4,0            | 11,1                      | 11,7    | 1,5                    | 5,1     |
| -4,0+2,36           | 8,6                       | 6,9     | 4,2                    | 5,4     |
| -2,36+1,0           | 24,5                      | 20,8    | 18,8                   | 7,9     |
| -1,0+0,5            | 26,6                      | 39,1    | 27,8                   | 9,2     |
| -0,5+0,3            | 10,9                      | 45,1    | 10,9                   | 6,3     |
| -0,3                | 17,3                      | n.a.    | 36,7                   | n.a.    |
| Total               | 100,0                     |         | 100,0                  |         |

Ensaio realizado em duplicata;  
n.a. = não analisado.

Na continuidade dos estudos, das frações obtidas (TABELA 4.6) a partir do minério de Santa Luzia, foram selecionadas quatro frações para realização dos ensaios de concentração granulométrica e/ou magnética.

#### 4.2.2. Concentração Gravimétrica

Os ensaios de concentração do minério de Santa Luzia foram efetuados de acordo com o esquema apresentado na FIGURA 4.13. Com a finalidade de comparar e discutir os resultados de concentração obtidos, foram processados também amostras de minérios de vermiculita Queimada Nova, para o qual foram mantidas as mesmas condições experimentais adotadas para o minério de Santa Luzia.

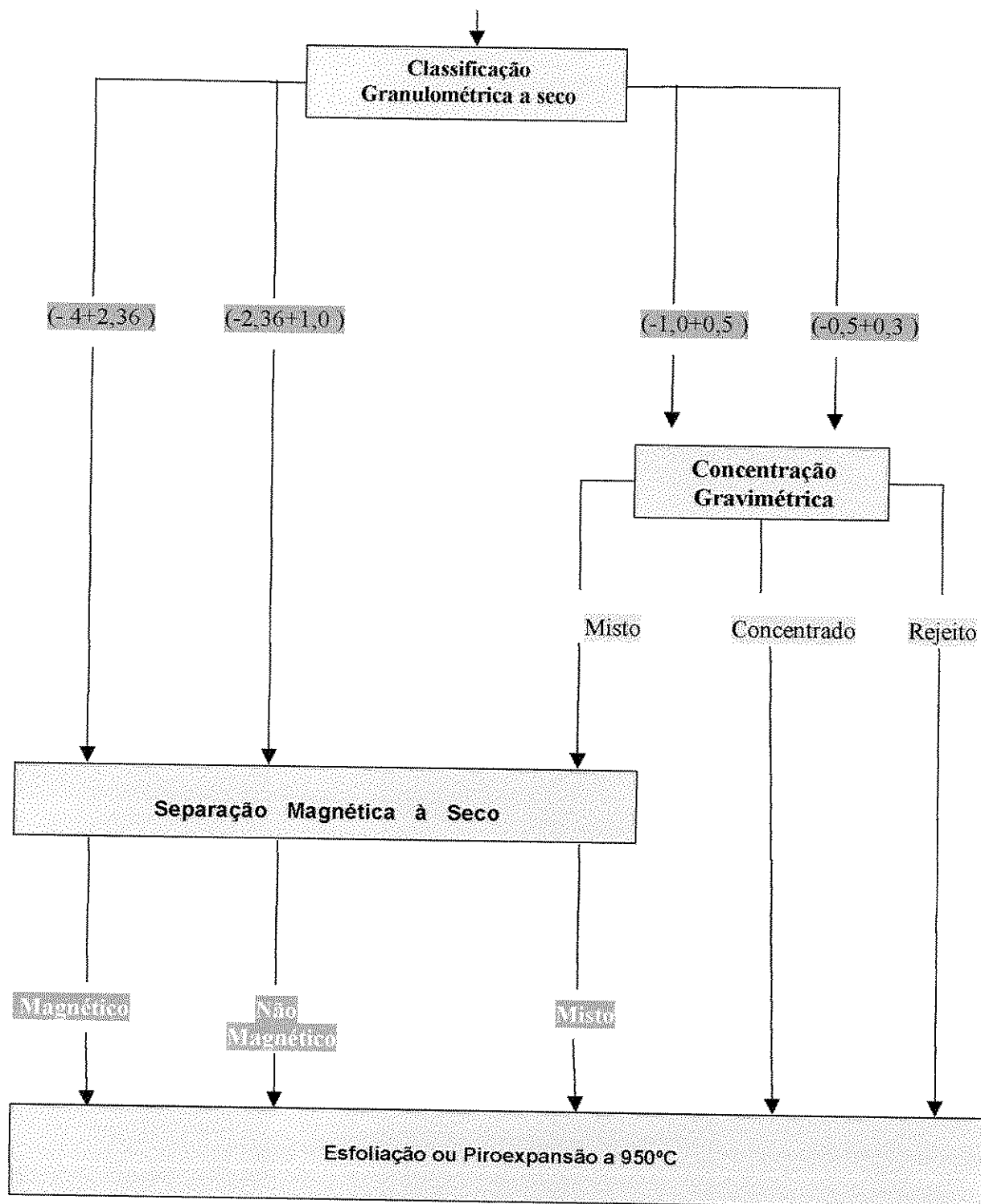


Figura 4.13 – Esquema adotado para os ensaios de concentração do minério de vermiculita de Santa Luzia.

A TABELA 4.7 apresenta os resultados de concentração gravimétrica realizadas com as frações, (-1,0+0,5) mm e (-0,5+0,3) mm. A massa de alimentação usada para cada ensaio foi de 250,0 g. Ensaio preliminares de concentração em mesa oscilatória foram efetuados com as frações (-4,00+2,36) mm e (-2,36+1,0) mm. Como estes não foram satisfatórios, as citadas frações foram processadas diretamente através de separação magnética (FIGURA 4.13).

Na TABELA 4.8 mostram-se os resultados de teores de vermiculita contidos nos concentrados e nos rejeitos, obtidos a partir da concentração gravimétrica das frações (-1,0+0,5) mm e (-0,50+0,30) mm correspondentes a ambos os minérios. Estes resultados permitiram verificar que, a vermiculita poderia ser separada em mesa oscilatória quando esta encontra-se nestas granulometrias. No processamento da fração (-0,50+0,30) mm do minério de Santa Luzia obteve-se uma massa percentual do concentrado de 35,4 % (teor 71,6 %) e 31,3 % de rejeito (teor 16 %). O teor de 45,1 % de vermiculita na alimentação foi para 71,6 %, em uma única etapa de concentração. Para o minério de Queimada Nova obteve-se nesta fração, da massa total, 27,6 % de concentrado (teor de 71,1 %) e 13,8 % da massa correspondeu ao rejeito (teor de 35,7 %). Este método de processamento gravítico poderia tornar-se uma alternativa para o aproveitamento de vermiculita contida em frações finas ou menores que 0,5 mm.

Em um futuro não muito distante, com o esgotamento das frações nobres de vermiculita, haverá que se modificar as atuais usinas de beneficiamento para processar materiais mais finos, provavelmente, com granulometrias menores a 0,5 mm.



**TABELA 4.7** - Concentração gravimétrica a úmido em mesa oscilatória de algumas frações dos minérios de vermiculita de Santa Luzia e de Queimada Nova.

| FAIXA<br>GRANULOMÉTRICA<br>(mm) | MINÉRIO DE VERMICULITA SANTA LUZIA      |      |       |      |         |      |        |
|---------------------------------|---|------|-------|------|---------|------|--------|
|                                 | Concentrado                             |      | Misto |      | Rejeito |      | Perdas |
|                                 | (g)                                     | (%)  | (g)   | (%)  | (g)     | (%)  | (%)    |
| -1,00+0,50                      | 72,5                                    | 29,1 | 132,8 | 53,3 | 44,0    | 17,7 | 0,3    |
| -0,50+0,30                      | 87,9                                    | 35,4 | 82,5  | 33,2 | 77,8    | 31,3 | 0,8    |
| FAIXA<br>GRANULOMÉTRICA<br>(mm) | MINÉRIO DE VERMICULITA DE QUEIMADA NOVA |      |       |      |         |      |        |
|                                 | Concentrado                             |      | Misto |      | Rejeito |      | Perdas |
|                                 | (g)                                     | (%)  | (g)   | (%)  | (g)     | (%)  | (%)    |
| -1,00+0,50                      | 61,1                                    | 24,5 | 97,9  | 39,3 | 90,3    | 36,2 | 0,3    |
| -0,50+0,30                      | 68,9                                    | 27,6 | 145,1 | 58,5 | 34,2    | 13,8 | 0,7    |

**TABELA 4.8** -Teores de vermiculita contidos nos concentrados e nos rejeitos obtidos a partir da concentração gravimétrica de algumas frações dos minérios de vermiculita de Santa Luzia e Queimada Nova.

| FAIXA<br>GRANULOMÉTRICA<br>(mm) | TEORES (%)              |         |                           |         |
|---------------------------------|-------------------------|---------|---------------------------|---------|
|                                 | Vermiculita-Santa Luzia |         | Vermiculita-Queimada Nova |         |
|                                 | Concentrado             | Rejeito | Concentrado               | Rejeito |
| -1,00+0,50                      | 56,4                    | 16,5    | 68,1                      | 13,7    |
| -0,50+0,30                      | 71,6                    | 16,0    | 71,1                      | 35,7    |

#### 4.2.3. Separação Magnética

Os produtos mistos (FIGURA 4.13) obtidos a partir da concentração gravimétrica das frações (-1,0+0,5) mm e (-0,5+0,3) mm, bem como as frações (-4,0+2,36) mm e (-2,36+1,0) mm, foram processados em um separador magnético de alta intensidade a seco, e os resultados estão apresentados na TABELA 4.9. Os produtos obtidos foram três: magnético, misto e não-magnético, cujos teores para todas as frações de ambos os minérios estão mostrados na TABELA 4.10.

**TABELA 4.9** - Separação magnética a seco de frações granulométricas pertencentes aos minérios de vermiculita de Santa Luzia e Queimada Nova.

| FAIXA<br>GRANULOMÉTRICA<br>(mm) | MINÉRIO DE VERMICULITA DE SANTA LUZIA |      |       |      |               |      |        |
|---------------------------------|---------------------------------------|------|-------|------|---------------|------|--------|
|                                 | Magnético                             |      | Misto |      | Não-magnético |      | Perdas |
|                                 | (g)                                   | (%)  | (g)   | (%)  | (g)           | (%)  | (%)    |
| -4,00+2,36                      | 77,7                                  | 31,1 | 66,7  | 26,7 | 105,3         | 42,2 | 0,1    |
| -2,36+1,00                      | 119,8                                 | 47,9 | 57,4  | 23,0 | 73,0          | 29,2 | 0,1    |
| -1,00+0,50                      | 72,5                                  | 54,6 | 37,2  | 28,0 | 23,1          | 17,4 | -      |
| -0,50+0,30                      | 58,0                                  | 70,3 | 16,0  | 19,5 | 8,4           | 10,2 | -      |
| FAIXA<br>GRANULOMÉTRICA<br>(mm) | MINÉRIO DE VERMICULITA QUEIMADA NOVA  |      |       |      |               |      |        |
|                                 | Magnético                             |      | Misto |      | Não-magnético |      | Perdas |
|                                 | (g)                                   | (%)  | (g)   | (%)  | (g)           | (%)  | (%)    |
| -4,00+2,36                      | 15,3                                  | 10,2 | 39,4  | 26,3 | 94,9          | 63,4 | 0,1    |
| -2,36+1,00                      | 83,0                                  | 33,6 | 43,2  | 17,5 | 120,6         | 48,9 | 0,1    |
| -1,00+0,50                      | 53,9                                  | 55,1 | 27,6  | 28,2 | 16,4          | 16,7 | -      |
| -0,50+0,30                      | 81,8                                  | 56,4 | 21,0  | 14,4 | 42,3          | 29,2 | -      |

Conforme pode ser observado na TABELA 4.10, os teores de vermiculita são maiores nos produtos magnéticos, com exceção da fração (- 4,0+2,36) mm do minério de Queimada Nova. Os produtos não magnéticos, em geral, apresentaram menores teores em relação aos produtos magnéticos. Enquanto que os produtos mistos, principalmente das frações mais grosseiras, possuem teores ainda importantes de vermiculita, devendo estes serem reprocessados.

**TABELA 4.10** - Teores de vermiculita contidos nos concentrados obtidos a partir da separação magnética dos minérios de vermiculita de Santa Luzia e Queimada Nova.

| FAIXA<br>GRANULOMÉTRICA<br>(mm) | TEORES (%)                 |       |         |                              |       |         |
|---------------------------------|----------------------------|-------|---------|------------------------------|-------|---------|
|                                 | Vermiculita de Santa Luzia |       |         | Vermiculita de Queimada Nova |       |         |
|                                 | Magn.                      | Misto | Não-mag | Magn.                        | Misto | Não-mag |
| -4,00+2,36                      | 85,8                       | 85,3  | 18,4    | 11,7                         | 68,5  | 23,9    |
| -2,36+1,00                      | 87,7                       | 65,7  | 13,4    | 63,9                         | 37,2  | 17,5    |
| -1,00+0,50                      | 59,4                       | 20,5  | 5,4     | 69,1                         | 32,6  | 16,0    |
| -0,50+0,30                      | 52,1                       | 11,9  |         | 51,0                         | 27,8  | 8,8     |

Os resultados obtidos de concentração, permitiram verificar a aplicabilidade de métodos gravimétricos e/ou em combinação com separação magnética para processar o minério de Santa Luzia, e especialmente para o aproveitamento das frações finas.

### 4.3 - Esfoliação

Em decorrência dos baixos teores de vermiculita obtidos para a amostra do minério de Casserengue, não foram estudadas as propriedades de esfoliação deste material. Neste tópico, foi avaliada a variação da esfoliação térmica em função de alguns parâmetros relevantes no processo: (a) granulometria do material; (b) temperatura de piroexpansão; e (c) tempo de residência das partículas. A esfoliação foi quantificada através da MEA e do rendimento volumétrico de esfoliação ( $\eta$ ), cujos valores foram representados graficamente. Com a finalidade de um melhor monitoramento do processo de esfoliação da vermiculita de Santa Luzia, os resultados foram comparados com amostras de vermiculita de Queimada Nova. Para a realização destes ensaios foram adotadas as mesmas condições experimentais que a utilizada para a amostra de Santa Luzia.

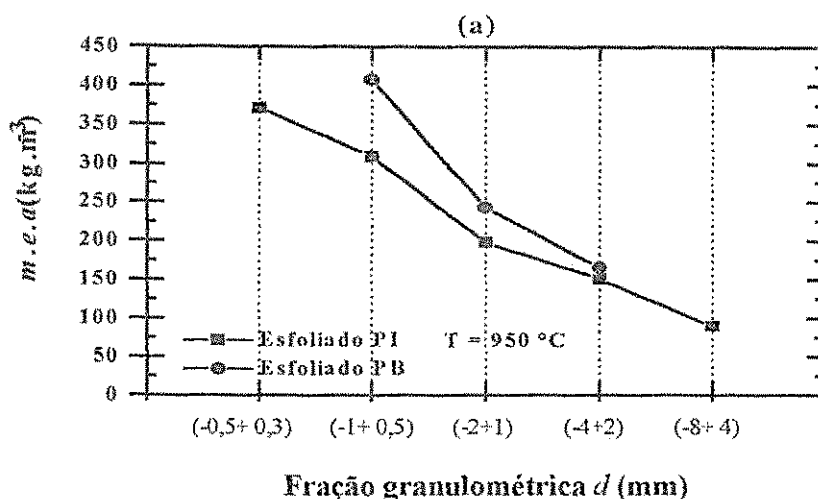
#### 4.3.1. Efeito da granulometria

Os resultados dos ensaios de esfoliação térmica encontram-se apresentados na FIGURAS 4.14 e 4.15. Os resultados de MEA representados na FIGURA 4.14 mostraram que, após a esfoliação, a amostra de vermiculita Santa Luzia apresentou maiores valores de MEA, em todas as frações granulométricas, em relação à amostra de Queimada Nova. Este comportamento deve-

se, possivelmente, às diferenças na composição mineralógica nessas amostras. As diferenças na mineralogia referem-se ao grau de interstratificação de vermiculita+biotita que deve ser mais acentuada na amostra de Queimada Nova. Quanto maior essa interstratificação, maior será a dificuldade de difusão das moléculas de água. As moléculas de água, em estado de vapor, exercem uma maior pressão sobre as camadas T-O-T e saem de uma forma mais explosiva, conduzindo ao aumento da esfoliação (Machado, 2002).

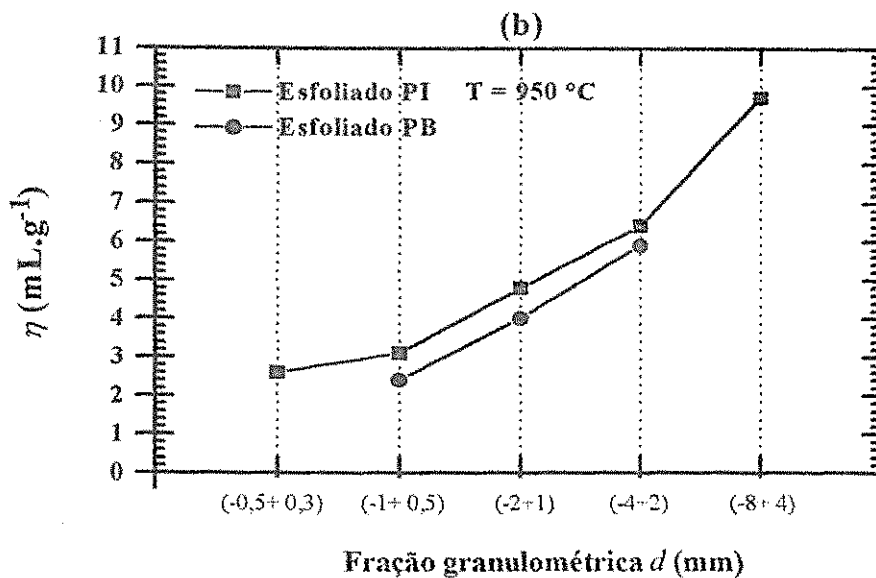
Os ensaios foram efetuados à temperatura de 950 °C e os tempos de residências foram diferenciados para cada fração granulométrica, e foram de: 6 s (-8+4)mm, 5 s (-4+2) mm e (-2+1) mm e 4 s (-1+0,5) mm e (-0,5+0,3) mm. Os tempos de residências foram selecionados com base na metodologia utilizada pela Eucatex.

Por outro lado, a MEA decresce com o aumento da granulometria. A fração (-8+4) mm da amostra de vermiculita de Queimada Nova possui o menor valor de MEA, em comparação às outras granulometrias. Esse comportamento deve-se a que nas placas de maiores tamanhos, as moléculas de água têm de se deslocar a maiores distâncias; isto é, as barreiras estruturais são maiores para saírem de dentro do espaço intercamada (Santos e Navajas, 1981). Com isso, aumentando-se a granulometria das placas, aumenta-se a velocidade de rompimento da camada de água, gerando-se flocos mais esfoliados.



**FIGURA 4.14** - Efeito da granulometria sobre a massa específica aparente (MEA) de amostras de concentrado de vermiculita de Santa Luzia e vermiculita de Queimada Nova.

O rendimento volumétrico da esfoliação quantifica o volume de material esfoliado em mL por cada grama de concentrado ou de minério. A FIGURAS 4.15 representa a variação de  $\eta$  em função da granulometria do material. Essa figura mostra que a vermiculita de Santa Luzia apresentou menores valores de  $\eta$  em relação à vermiculita de Queimada Nova. Para ambas as amostras, observa-se um aumento do valor de  $\eta$  com o aumento da granulometria. A menor esfoliação da vermiculita de Santa Luzia deve-se, provavelmente, às variações na composição mineralógica, ou seja, a interstratificação de vermiculita+biotita é menor nessa amostra. Esses resultados, tanto de MEA quanto de  $\eta$ , permitiram constatar que melhores resultados de esfoliação foram obtidos com a vermiculita de Queimada Nova.



**FIGURA 4.15** - Efeito da granulometria sobre o rendimento volumétrico da esfoliação ( $\eta$ ) de amostras de concentrado de vermiculita Santa Luzia e vermiculita de Queimada Nova.

#### 4.3.2. Efeito da Temperatura

Na FIGURA 4.16 está representado o efeito da temperatura sobre o rendimento volumétrico da esfoliação. A FIGURA 4.16 mostra que, para ambas as amostras, com o aumento da temperatura há um aumento do valor de  $\eta$ . O maior valor de  $\eta$ , que foi de 5,9 e de 6,4 para a amostra de Santa Luzia e de Queimada Nova, respectivamente, foi alcançado com 950 °C. Os ensaios foram realizados com concentrados de granulometria (-4+2) mm e tempo de residência de 5s. O aumento da temperatura influenciou diretamente na MEA e rendimento volumétrico da esfoliação. Nesta temperatura, foram obtidos os menores valores de MEA e maiores valores de  $\eta$  de vermiculita.

É bastante provável que aumentado-se a temperatura para valores acima de 1000 °C e tempos de residência maiores de 60 s, os valores de  $\eta$  diminuam e os da MEA aumentem, devido às reações internas e à formação de novas fases minerais que conduziram à obtenção de um material muito mais denso e muito mais friável (Machado, 2000).

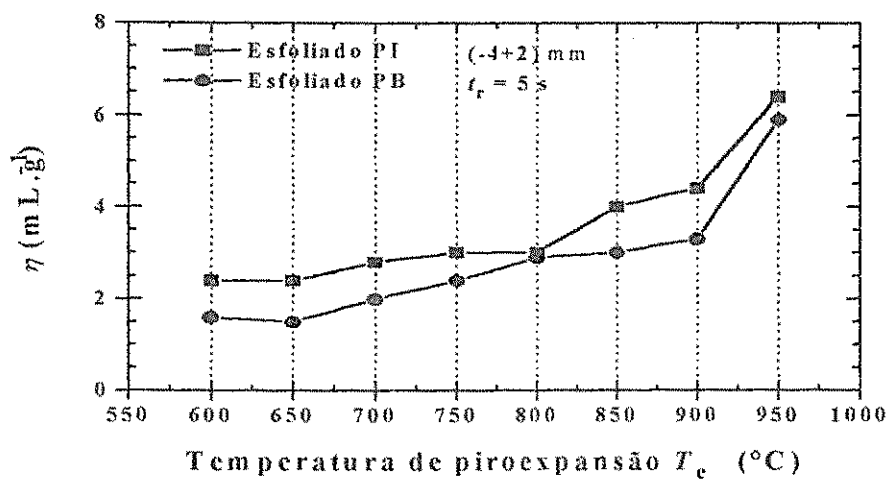


FIGURA 4.16 - Efeito da temperatura  $T_c$  sobre o rendimento volumétrico da esfoliação ( $\eta$ ) das amostras de concentrado de vermiculita – Santa Luzia e vermiculita de Queimada Nova

#### 4.3.3. Efeito do Tempo de Residência

Na figura 4.17 está representado o efeito do tempo de residência sobre o rendimento volumétrico da esfoliação.

Em relação ao efeito do tempo de residência, foi observado um aumento muito mais acentuado de  $\eta$  entre 2 e 10 s (FIGURA 4.17). Entre 10 e 60 s o valor de  $\eta$  manteve-se em um patamar. O aumento do tempo de residência também influenciou na MEA e no teor de

vermiculita. Uma diminuição da MEA e um aumento do teor de vermiculita foi constatado ser mais pronunciado entre 2 e 10 s, alcançando uma estabilização acima de 10 e até 60 s. Os ensaios foram realizados com concentrados de granulometria (-4+2) mm e temperatura de 950 °C.

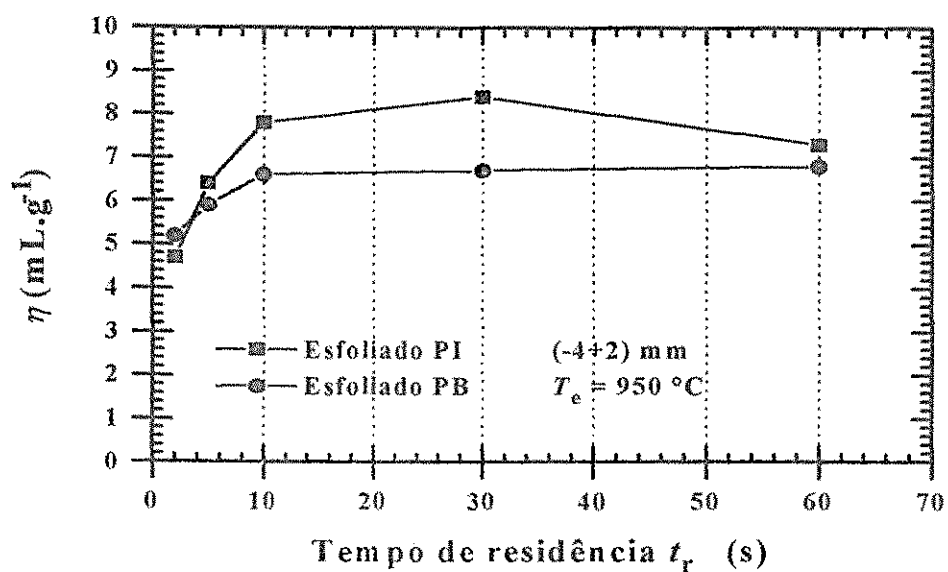


FIGURA 4.17 - Efeito do tempo de residência  $t_r$  sobre o rendimento volumétrico da esfoliação ( $\eta$ ) da amostras de concentrado de vermiculita - Santa Luzia e vermiculita de Queimada Nova.



## CAPÍTULO V

### 5 – CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, permitiram extrair as seguintes conclusões:

Os resultados de caracterização mineralógica mostraram que o minério de vermiculita de Santa Luzia é constituído pelos os seguintes minerais: filossilicatos: biotita, moscovita, vermiculita, illita, talco e serpentina. O piroxênio detectado foi o diopsídio e os anfibólios: actinolita e honblenda. Entre os feldspatos: microclínio e os carbonatos; calcita e dolomita e um óxido de ferro: goetita. No minério de Casserengue foram identificados: os filossilicatos: biotita, vermiculita e illita, sendo que a espécie predominante é a biotita. Entre os feldspatos foi detectado a presença de albita. Entre os anfibólios foi detectada actinolita.

Foi verificado que ambas as amostras dos minérios apresentam diferenças marcantes na composição mineralógica e química. No minério de Santa Luzia, a vermiculita foi identificada em placas ou partículas bem como compondo placas com interestratificações de vermiculita + biotita. No minério de Casserengue, a biotita preserva as suas características decorrentes de sua origem primária e apresenta-se compondo placas e massas irregulares laminadas pouco intemperizadas.

Foi observado que, a vermiculita de Santa Luzia não apresenta uniformidade mineralógica na superfície exposta dos planos. Na amostra de Santa Luzia, as placas apresentam um maior estado de alteração mineralógica, em relação à amostra de Casserengue, e encontram-se associadas com espinélio o qual compõe cristais e depósitos na superfície exposta das placas. Devido à baixa concentração de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  no mineral, este elemento, não representa problemas às propriedades de esfoliação da vermiculita. No minério de Casserengue o mineral predominante é a biotita e a vermiculita encontra-se em menor proporção.

Os resultados dos ensaios de concentração gravimétrica e separação magnética, realizados com amostras de minério de Santa Luzia foram considerados aceitáveis e permitiram verificar que os mesmos foram apropriados para processamento das frações (-1,0+0,5)mm e (-0,5+0,3)mm. Estes métodos apresentar-se-iam como uma importante alternativa quando houvesse necessidade de processamento das frações finas de vermiculita, atualmente pouco aproveitadas.

Para o minério de Casserengue foi verificado que em função dos baixos teores de vermiculita determinados nas frações, o mesmo não possui condições favoráveis para o seu aproveitamento industrial.

Foi verificado que com o aumento da granulometria, ocorre um aumento da esfoliação, provavelmente em função do aumento da velocidade de rompimento da camada de água no espaço interlamelar.

Para ambas as amostras, de Santa Luzia e Queimada Nova na granulometria  $-4+2$  mm, a melhor esfoliação foi observada a  $950^{\circ}\text{C}$  de temperatura e a um tempo de residência de, no mínimo, 10 segundos.

Os resultados de esfoliação indicaram que a vermiculita de Santa Luzia apresentou algumas diferenças em relação à amostra de Queimada Nova. A vermiculita de Santa Luzia apresentou maiores valores do MEA e menor valor do rendimento volumétrico de esfoliação ( $\eta$ ), quando determinados em função da variação granulométrica, da temperatura e do tempo de residência. As diferenças nas propriedades de esfoliação entre as amostras deveu-se às variações de composição mineralógica e/ou ao grau de interstratificação, de vermiculita + biotita.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANHA, I. B.; OLIVEIRA, C. H.; NEUMANN, R.; ALCOVER NETO A.; LUZ, A. B. **Caracterização mineralógica de bentonitas brasileiras**. Anais do XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, v.1, Recife, Brasil, p.554-561, 2002.

ASSUNÇÃO, L.M.C. **Estudos da expansão e caracterização de vermiculitas nordestinas**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Química - UFPB, Campina Grande - PB, Brasil, 93p, 1985.

CASTELLI, A. V. **Well drilling materials - Industrial mineral and rocks**. Society for Mining, Metallurgy and Explotation Inc. Publisher. 6<sup>th</sup> ed., Donald A. Carr Ed., Littleton, Colorado, EUA, p.1113-1118, 1994.

CASTRO, O.G. **A vermiculita e suas aplicações**. Relatório Técnico: Aporte Consultores e Associados Ltda, São Paulo, Brasil, 54p, 1996.

CAVALCANTI, E. E. N. DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral - **Sumário Mineral da Vermiculita 2002**, p.120-121, Brasil, 2002.

DANA, J. D. **Manual de Mineralogia**; revisto por Cornelius S. Hurlbut, Jr., tradução de Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 513-518, 1981.

DE LEON, A. T.; NUNES; D. G.; RUBIO, J. Remoção de íons de metais pesados com bentonitas modificadas. Anais do **VI Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology e XVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, v.3, Rio de Janeiro, Brasil, p.464-470, 2001.

DNPM. **Sumário Mineral**, v.20, Brasília, Brasil, 2000.

DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro**, Brasília, Brasil, 2001.

DIXON, J. B.; WEED, S. B. **Minerals in soil environments**. Soil Science Society of America, Madison, Winsconsin, USA, 948p., 1977.

EUCATEX MINERAÇÃO LTDA. Folhas técnicas: 60. MO-01/01-Nov. 1993; 60.MO-02/01-Nov.1993; 60. VE-02/00, 1994.

FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. Utilização da vermiculita como adsorvente de compostos orgânicos poluentes da indústria do petróleo. Anais do **XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, v.1, Recife, Brasil, p.547-553, 2002.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. McGraw-Hill Book Company Inc, New York, USA, 384p., 1953.

GRIM, R. E. **Applied Clay Mineralogy**. McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, USA, 422p., 1962.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. McGraw-Hill Book Company, Second Edition, New York, USA, 596p., 1968.

GUARINO, A. W. S. **Síntese, caracterização e atividade catalítica de argilas brasileiras ácidas e intercaladas com cátions metálicos**. 1999. 201p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

HENNIES, W.T.; STELLIN, J.A. **A jazida de vermiculita de Paulistana, Estado do Piauí**. Relatório Técnico: Eucatex Mineração Ltda., São Paulo, Brasil, 1983.

HENNIES, W. T.; STELLIN Jr., A. Testes de piroexpansibilidade em vermiculitas brasileiras. **Geologia e Metalurgia**, Nº 40, São Paulo, Brasil, p.433-445, 1976.

HINDMAN, J.R. Vermiculite. In: **Industrial Minerals and Rocks**. Donald A. Carr (editor). Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Publisher. Littleton, Colorado, EUA, p. 1103- 1111, 1994.

LEITÃO, T.J.V. **A Intercalação de cátions metálicos e seu efeito sobre as propriedades de esfoliação e inchamento da vermiculita de Santa Luzia-PB**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Mineração e Geologia -UFPB, Campina Grande-PB, Brasil, 95p, 2003.

LOWELL, A.D. Vermiculites. In: **Minerals in Soil Environments**. Soil Science Society of America Pub., Madison, Wisconsin, EUA, p. 259-295, 1977.

MACHADO, L.C.R. **Caracterização de vermiculitas visando sua esfoliação e hidrofobização para a adsorção de substâncias orgânicas**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia - UFOP, Ouro Preto - MG, Brasil, 150p, 2000.

MACHADO, A. O. D. V.; ARAÚJO, J. M. M. **Influência do carbonato de sódio em dispersões de bentonita**. Anais do XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, v.1, Recife, Brasil, p. 570-573, 2002.

MACKENZIE, R.C. **The differential thermal investigations of clays**. Mineralogical Society, London, England, p. 191-204, 1957.

MAIA, D. F. **Vermiculita modificada pela troca por cátions cromo (III): Síntese e atividade catalítica na decomposição do peróxido de hidrogênio**. 1995. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995.

MARTINS, J.; MACHADO, L.C.R.; MARCOS, C.; ZACARIAS, C.M. **Caracterização tecnológica de vermiculitas brasileiras**. Anais do XVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa e VI SHMMT, v.3. Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

MELO, M. A. F.; MELO, D. M. A.; PINTO, C. H. C. **Carnauba wax used as an hydrophobic agent for expanded vermiculite**. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.15, Nº 1, São Paulo, Brasil, 1998.

MINEBRA – **Vermiculita - Minérios Brasileiros Mineração e Industrialização Ltda.**, São Paulo, Brasil, 2002.

MINERAL COMMODITY SUMMARIES, [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov), 2000.

PARENTE, R. C.; OLIVEIRA, U. L. **Perfil analítico da vermiculita**. Ministério das Minas e Energia – DNPM, boletim Nº 60, Brasília, Brasil, 38p., 1986.

PARENTE, R. C. Geologia da vermiculita. **Principais depósitos minerais do Brasil**. Cap. 56. Ministério das Minas e Energia – DNPM e CPRM, v. IV, Fortaleza, Brasil, p.621-627, 1989.

PARENTE, R. C.; ROBERTO, F. A. C. Depósito de vermiculita de Paulistana, Piauí. **Principais depósitos minerais do Brasil**. Cap.57. Ministério das Minas e Energia – DNPM e CPRM, v.IV, Fortaleza, Brasil, p.629-634, 1989.

PARENTE, R.C. e Oliveira, U.L. **Perfil analítico da vermiculita**. Ministério das Minas e Energia - DNPM, Boletim n. 60, Brasília, Brasil, 38p, 1986.

POTTER, M. J. **Vermiculite**. U. S. Bureau of Mines, 1995. Disponível em: <<http://www.usgs.gov>>. Acesso em: 10 de setembro de 2002.

ROSENBERG, J. P. Vermiculitas brasileiras e usos industriais. **Cerâmica**, 15 (59), p.195-208, 1969.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; LINS, F. F. **Vermiculita - Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil**. UBM União Brasileira de Mineração CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, p.377-382, 2001.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. Ed. E. Blucher, 2ª edição, v.3. São Paulo, Brasil, 1989.

SANTOS, P.S.; NAVAJAS, R. **Estudos sobre piroexpansão de vermiculitas brasileiras - uma revisão**. **Cerâmica**, v.27, n.143, p. 423-441, 1981.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**, Editora Edgard Blücher Ltda. v.1, São Paulo, Brasil, 340p., 1975.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**, Editora Edgard Blücher Ltda. v.2, São Paulo, Brasil, 802p. 1975.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**, Editora Edgard Blücher Ltda. v.2, São Paulo, Brasil, 861p. 1992.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**, Editora Edgard Blücher Ltda. v.3, São Paulo, Brasil, 1089p., 1992.

VERMICULITE ASSOCIATION. **Vermiculite - Health, safety and environmental aspects**. Lincoln, United Kingdom, 10p., 2000. Disponível em: <<http://www.vermiculite.org>>. Acesso em: 10 de setembro de 2002.

VERMICULITE ASSOCIATION. **Vermiculite**, 2002. Disponível em: <<http://www.vermiculite.org>>. Acesso em: 10 de setembro de 2002.

VALDIVIEZO, E. V.; SOUZA, M. M.; LEITÃO, T. J. V.; GUERRA, E. A. Caracterização e esfoliação térmica de vermiculitas dos estados da Paraíba e do Piauí. **Anais do XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, v.1, Recife, Brasil, p.562-569, 2002.

VALDIVIEZO, E. V. **Caracterização tecnológica de insumos minerais para a perfuração de poços de petróleo – Sub-projeto: Estudo de caracterização e processamento de vermiculitas para aplicações em fluidos de perfuração de poços de petróleo**. Relatório Final, FINEP-CTPETRO/FADE, Campina Grande, Brasil, 22p. 2003.

VELDE, B. **Introduction to clay minerals**. Chemistry, origins, uses and environmental significance. London, U.K., 198p, 1992.