

CAPÍTULO 38

Vermiculita

José Fernandes de Oliveira Ugarte¹

João Alves Sampaio²

Silvia Cristina Alves França³

1. INTRODUÇÃO

A vermiculita, $(\text{Mg, Fe})_3 [(\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10}] [\text{OH}]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, é um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro, com uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal. O termo vermiculita é utilizado também para designar comercialmente um grupo de minerais micáceos constituído por cerca de dezenove variedades de silicatos hidratados de magnésio e alumínio, com ferro e outros elementos. O nome vermiculita é derivado do latim *vermiculus*, que significa pequeno verme e se deve ao fato de que esse material se expande sob aquecimento, durante o qual suas partículas movimentam-se de forma semelhante aos vermes.

Suas propriedades de superfície, somadas aos elevados valores de área superficial específica, porosidade e carga superficial (negativa), fazem da vermiculita um material adequado para o uso como adsorvente ou como carreador. A sua capacidade de troca iônica é estimada em valores na faixa entre 100 e 130 meq/100 g. Sua baixa elasticidade, baixa densidade e elevadas capacidades de adsorção e absorção permitem que a vermiculita seja também usada na composição de materiais para embalagens de uma variedade de produtos industrializados.

O valor comercial da vermiculita está, exatamente, na camada de moléculas de água que intercala as camadas de alumínio e silício na estrutura do mineral, a qual responde pelo seu elevado índice de expansão. Essas moléculas de água, quando aquecidas de forma rápida, a temperaturas elevadas, transformam-se em correntes de ar quente e causam aumento no volume do mineral. Esse processo, chamado de expansão térmica, confere ao produto final múltiplas aplicações industriais. Na forma expandida, a vermiculita é quimicamente ativa, biologicamente inerte, além de possuir baixa densidade.

¹Eng^o Químico/UFPA, D.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Pesquisador da COPPE-UFRJ.

²Eng^o de Minas/UFPE, D.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Tecnologista Sênior do CETEM/MCT.

³Eng^a Química/UFS, D.Sc. em Engenharia Química/COPPE-UFRJ, Tecnologista do CETEM/MCT.

O mineral comercializado na forma expandida possui propriedades como baixos valores de massa específica aparente e de condutividade térmica. Essas características, associadas à granulometria, tornam o produto de vermiculita bastante atrativo para sua utilização em diversas áreas, dentre as quais, na construção civil, na agricultura, nas indústrias química, de tintas, dentre outras.

A vermiculita expandida, quando recoberta por compostos de magnésio, pode remover com eficiência efluentes gasosos de usinas geradoras de eletricidade. Assim, são removidas quantidades significativas de enxofre e nitrogênio dos efluentes gasosos.

O mineral possui uma faixa de composições que depende da composição da mica que a originou, da variação química durante o intemperismo e da troca iônica durante o processo de formação.

No Brasil, há depósitos e jazidas de vermiculita nos estados da Paraíba, Goiás e Piauí. Os minérios brasileiros não contêm asbestos, o que confere aos concentrados de vermiculita maior valor agregado, além de favorecer o melhor aproveitamento econômico do bem mineral. Uma aplicação atrativa para a vermiculita é como material adsorvente/absorvente, devido às propriedades de troca iônica que possui, semelhante a algumas argilas e zeólitas, podendo ser utilizada em processos de remoção de contaminantes orgânicos e na purificação de águas residuais contendo sais dissolvidos (França et al., 2005; Neto e Ugarte, 2007).

Com relação às expectativas de crescimento no mercado, o comércio desse mineral atinge um valor da ordem de 200 milhões de dólares por ano, com um mercado futuro projetado para atingir países do primeiro mundo. Na última década, os tradicionais produtores mundiais de vermiculita, África do Sul e Estados Unidos, passaram a dividir mercado com novos fornecedores do produto, como a China, Zimbábue, Austrália e Índia. A China, em particular, é provedora de cerca de 50% dos mercados do Japão e Coreia do Sul (Jinyao, 2001), o que aponta a China como um grande concorrente no mercado mundial de vermiculita.

O Brasil detém 11% das reservas mundiais de vermiculitas e ocupa, atualmente, a quarta posição mundial na produção, com 6%. A produção nacional é da ordem de 35%, destacando o estado de Goiás como o maior produtor do minério beneficiado, seguido pelos estados do Piauí, Bahia e Paraíba. A lavra é a céu aberto, semi ou totalmente mecanizada. Segundo algumas estimativas, o consumo mundial de vermiculita, em 2006, foi de

516 mil toneladas, fornecidas em grande escala pela África do Sul (200 mil toneladas) seguida dos Estados Unidos (100 mil toneladas). No Brasil, a produção, em 2006, foi de 30 mil toneladas e o consumo interno, 23 mil toneladas (Cavalcanti, 2007).

2. MINERALOGIA E GEOLOGIA

Mineralogia

Para a efetiva compreensão das características mineralógicas da vermiculita, um mineral da família dos filossilicatos, faz-se necessário o conhecimento básico dos conceitos mineralógicos relacionados às micas, visto que a vermiculita tem semelhança, com o grupo micáceo.

Mica é um termo genérico aplicado a um grupo de minerais aluminossilicatados complexos, com estrutura lamelar e com diferentes composições químicas e propriedades físicas. As micas formam cristais planos hexagonais, com clivagem bem marcada, paralela à direção das superfícies planas, o que lhes confere a propriedade de delaminação (se dividir em lâminas) (Tanner Jr., 1994). Algumas micas possuem maior facilidade de delaminação, como é o caso da muscovita que, quando proveniente de pegmatitos, delamina mais facilmente do que a flogopita. Em geral, as micas provenientes de pegmatitos intemperizados possuem maior facilidade de delaminação.

Os depósitos de mica podem produzir micas em formato de folhas ou de lascas. As micas em formato de folhas são geralmente muscovitas e são encontradas em pegmatitos de granulometria grossa. As micas em lascas são provenientes de pegmatitos intemperizados. Antigamente as lascas de mica constituíam subproduto ou rejeito das operações com as micas em folha, porém a demanda crescente incentivou o desenvolvimento de métodos de lavra nesses pegmatitos. Esse tipo de mica também é largamente encontrado em depósitos de mica xisto, caracterizado por seus corpos largos e maior percentagem de micas do que os pegmatitos.

A vermiculita é um silicato hidratado de formato lamelar, contendo quantidades variáveis de ferro, magnésio, potássio e alumina. Suas características físicas são as mesmas das micas, no que se refere à clivagem típica, separando-se em finas lamelas flexíveis, porém sem elasticidade. Suas cores variam do bronze ao amarelo-amarronzado, com brilho perolado típico. A dureza do mineral pode variar de 2,1 a 2,8, na escala Mohs, com massa específica de 2,5 g/cm³.

A estrutura cristalina lamelar é formada pela célula unitária do grupo do argilomineral 2:1, que contém duas camadas tetraédricas de silício (tetracoordenado) e uma camada octaédrica de alumínio (hexacoordenado) entre elas. Os grupos tetraédricos e octaédricos têm seus vértices compostos por átomos ou íons oxigênio e íons hidroxila, que estão ao redor de pequenos cátions, destacando Si^{4+} e Al^{3+} , eventualmente Fe^{3+} e Fe^{2+} , nos grupos tetraédricos, e Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} e Ti^{4+} , eventualmente Cr^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} e Li^{+} , nos grupos octaédricos, geralmente com certo grau de substituição isomórfica. Todas as posições da camada octaédrica podem ser preenchidas (forma trioctaédricas) ou somente dois terços delas podem estar preenchidos (formas dioctaédricas) (Aguilar e Novaes, 2002; Muñoz e Castelló, 2003). Cabe mencionar que a estrutura cristalina tetraédrica ou octaédrica favorece a troca catiônica ao processo de intercalação da vermiculita, em que nova classe de materiais pode se formar, com a adsorção do agente intercalante, assim como sua aplicação na remoção de metais pesados e adsorção de óleo da indústria petrolífera (Ugarte e Monte, 2005A; Ugarte e Monte, 2005B; Santos e Masini, 2007).

As micas, especialmente a muscovita, são amplamente utilizadas na indústria devido às suas excepcionais propriedades físicas, químicas, elétricas, térmicas e mecânicas. Flogopita e vermiculita são as seguintes, na ordem de importância industrial. A biotita ainda não possui larga aplicação, devido ao elevado teor de ferro na sua estrutura.

A vermiculita, particularmente, é um mineral hidratado, que pode resultar da alteração de uma mica, mais comumente a biotita. Os minerais comumente associados à vermiculita são: a biotita, hidrobiotita, piroxenita, apatita, anfibólio, sienito, serpentinito, flogopita, diopsídio, clorita, amianto, talco e minerais argilosos. Estudos da caracterização tecnológica (Ugarte et al., 2004) mostraram que as vermiculitas de Santa Luzia (PB) e Sancrelândia (GO) são compostas de camadas mistas interestratificadas de vermiculita com outras fases mineralógicas (talco, hidrobiotita, biotita e flogopita), que, dependendo do teor dessas impurezas, podem interferir no processo de expansão do mineral. A Figura 1 ilustra um diagrama com estruturas da flogopita, vermiculita e uma estrutura mista estratificada, flogopita e vermiculita. Quimicamente, a composição da vermiculita é rica em óxidos. Na Tabela 1, encontra-se, de forma ilustrativa, uma comparação entre composições químicas médias de vermiculitas comerciais, brasileiras e internacionais (Hindman, 1994).

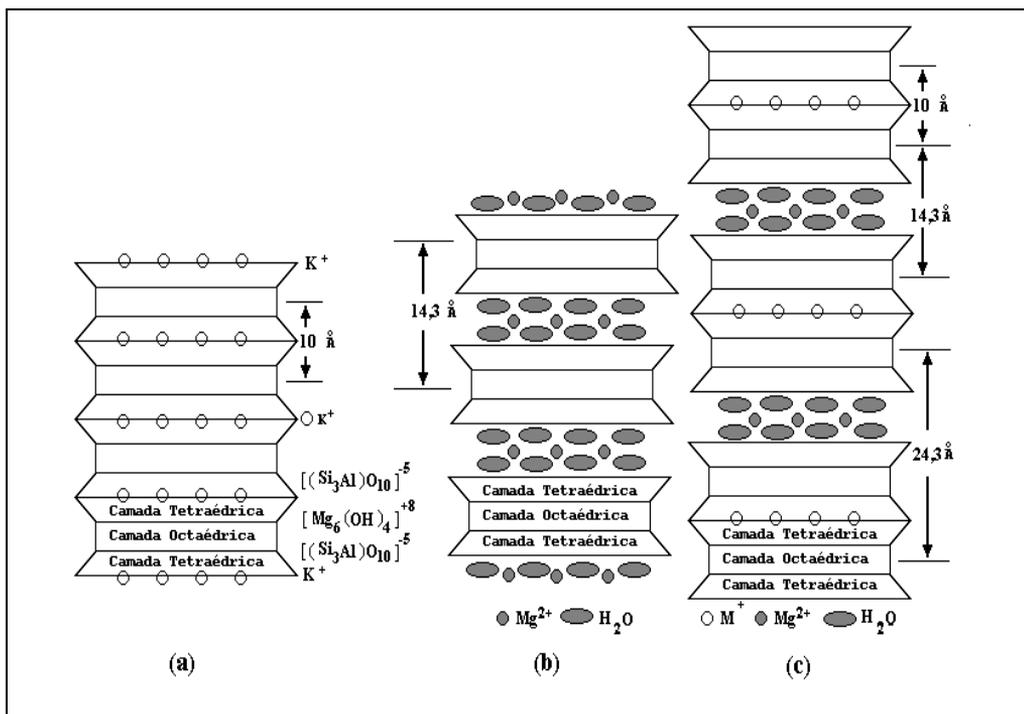


Figura 1 – Estruturas: (a) da flogopita; (b) da vermiculita com cátions de Mg hidratado nas regiões entre camadas de H_2O e (c) estratificada de flogopita com vermiculita (Bigham et al., 2001).

Tabela 1 – Composição química (%) média de vermiculitas comerciais brasileiras, inclusive de concentrados de vermiculitas internacionais.

Composição química (%) média de vermiculitas comerciais brasileiras							
Compostos	Santa Luzia (PB)	Sancrelândia (GO)		Massapé (PI)			
SiO ₂	42,8	40,4		45,10			
MgO	19,9	18,3		23,60			
Al ₂ O ₃	6,8	13,0		10,20			
Fe ₂ O ₃	6,7	8,5		5,80			
K ₂ O	4,6	3,7		0,50			
Na ₂ O	1,0	2,5		0,10			
CaO	0,56	1,4		3,60			
MnO	0,11	0,12		-			
TiO ₂	0,86	1,0		0,70			
NiO	0,29	0,21		-			
BaO	-	-		0,20			
Cr ₂ O ₃	0,45	0,31		-			
H ₂ O (total)	15,80	10,40		10,20			
Total	99,87	100,00		100,00			
Fontes: Santa Luzia (PB) (França e Luz, 2002), Sancrelândia (GO) (Ugarte et al., 2004); Massapé (PI) (Hindman, 1994).							
Concentrados de vermiculitas comerciais internacionais							
Composto	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	36,50	41,20	37,67	39,37	43,05	38,66	38,34
MgO	19,20	24,22	17,16	23,37	21,39	20,04	16,38
Al ₂ O ₃	14,50	12,68	14,23	12,08	10,01	17,36	12,85
Fe ₂ O ₃	10,50	4,60	8,07	5,45	1,90	8,45	8,80
K ₂ O	0,50	5,97	1,36	2,46	2,56	4,24	6,63
Na ₂ O	2,00	1,61	1,95	0,80	0,03	-	1,72
CaO	0,21	0,93	2,18	1,46	0,20	0,75	1,12
MnO	0,18	0,05	0,18	0,30	-	0,07	0,14
FeO	-	1,54	0,48	1,17	3,56	-	-
TiO ₂	0,75	1,38	0,20	1,25	1,00	-	1,66
Li ₂ O	-	-	-	-	0,03	-	0,01
BaO	-	-	-	-	0,03	0,12	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0,20	0,50	0,23
H ₂ O (total)	15,41	5,82	15,71	11,20	15,70	8,71	10,66
Total	99,64	99,99	99,19	98,97	99,4	98,61	99,34
1 - Austrália (Munglinup), 2 - China (Qieganbulake), 3 - Egito (Hafafit), 4 - África do Sul (Phalaborwa), 5 - Rússia (Kovdor), 6 - Estados Unidos (Chicago) e 7 - Estados Unidos (Louisa) (Hindman, 1994).							

Geologia

A vermiculita pode ser derivada da biotita, flogopita, diopsídio, hornblenda e serpentito por um dos processos seguintes:

- (i) intemperismo ao longo da zona de falha até a profundidade de 100m;
- (ii) alteração hidrotermal a baixa temperatura (menos que 350°C) de piroxenito, peridotitos, dunitos, carbonatitos e anfibolitos, cortados por granodioritos e pegmatitos, ambos alcalinos.

O fato de a vermiculita ser instável nas temperaturas acima de 350°C comprova a afirmação de que é possível a mesma, em profundidade da crosta terrestre, converter-se em biotita ou outros minerais como flogopita, diopsídio hornblenda ou serpentito. Este fato restringe o tamanho dos depósitos desse mineral, cuja existência em profundidade é considerada uma exceção. Assim, justifica-se o número reduzido de minas subterrâneas desse mineral.

Em decorrência de as alterações relativas ao processo de formação da vermiculita não serem completas, é comum a ocorrência do mineral intercalado com biotita ou clorita. Decorre deste fato, a existência de uma vermiculita natural de baixo valor agregado. Por outro lado, vermiculitas que resultaram da alteração da flogopita e biotita contêm partículas com granulometria grossa e, portanto, de boa qualidade.

Os elementos químicos contidos na vermiculita, em especial ferro, alumínio e magnésio, estão relacionados a uma alteração da biotita, por ação hidrotermal associada a micas. Esta, de um modo simples, pode ser entendida como uma solução aquosa aquecida, usualmente acima de 50°C, caracterizada por composição química complexa, dada por diversas substâncias dissolvidas. Essa solução ou fluido pode ser gerada em diversos sistemas geológicos, donde a fase aquosa e seus solutos terem fontes diversas, como, por exemplo: magmática e metamórfica. Nestes ambientes geológicos, a água pode ser progressivamente aquecida e reagir quimicamente com os minerais e rochas percolados, transformando-se então numa solução hidrotermal.

Os depósitos brasileiros e mundiais de vermiculita ocorrem principalmente dentro das zonas de complexos máficos, ultramáficos e carbonatitos. Por exemplo, Libby, nos Estados Unidos, considerado o maior do mundo e o de Phalaborwa (África do Sul). Outros pequenos depósitos são formados por dunitos, piroxenitos, peridotitos ou rochas máficas cortadas por

pegmatitos e sienitos e rochas graníticas (Birkett e Simandi, 1999; Simandi et al., 1999). Segundo estudos geológicos, os depósitos brasileiros são divididos em dois tipos:

- (i) os derivados de alteração da mica flogopita em carbonatitos e não silicática, como a maioria das rochas ígneas;
- (ii) os derivados de alteração da biotita em complexos metamórficos máficos e ultramáficos serpentinizados, quando expostos ao desgaste intenso e modificação em temperaturas elevadas.

A produção nacional é hoje restrita a corpos máficos e ultramáficos, que têm dimensões reduzidas e, em geral, são subverticais. Os depósitos carbonatitos têm maior dimensão para lavra a céu aberto, como é o caso do depósito de Phalaborwa, considerado o segundo maior do mundo, onde a vermiculita é um subproduto de lavra de cobre. Além disso, o Brasil conta com dezenas de depósitos carbonatitos que ainda não foram estudados e não estão incluídos nas reservas adicionais.

Segundo Reis (2002), depósitos associados a metassedimentos carbonáticos em seqüências vulcânicas metamorizadas ainda não foram descritos no Brasil. A ausência de normas brasileiras para efetuar cálculos de reserva minerais, para que sejam reconhecidas no mercado internacional, dificultam a classificação dos depósitos de vermiculita no País, que só podem ser identificados como recurso ou como reserva de minério. Na Tabela 2, constam os principais tipos de depósitos de vermiculita identificados no Brasil e suas reservas.

Tabela 2 – Principais depósitos de vermiculita identificados no Brasil (entre parênteses a percentagem de vermiculita) (Reis, 2002).

Depósito	Localização	Tipo	Vermiculita 10 ⁶ (t)
Catalão I	Ouvidor (GO)	Carbonatito	10 (20%)
Queimada Nova	Queimada Nova (PI)	Máfico e ultramáfico	1,95 (20%)
Santa Luzia	Santa Luzia (PB)	Máfico e ultramáfico	> 7 (30%)
Sancrelândia	Sancrelândia (GO)	Máfico e ultramáfico	1,5 (30%)
Montes Belos	Montes Belos (GO)	Máfico e ultramáfico	2 (30%)
Brumado	Brumado (BA)	Máfico e ultramáfico	2 (25%)

3. LAVRA E PROCESSAMENTO

Lavra

Por conta dos custos de mineração e beneficiamento, além daqueles relativos ao transporte do concentrado final, é desejável lavar a vermiculita com teor bastante elevado. Mesmo assim, os minérios de baixo teor (entre 20 e 30%) podem ser aproveitados economicamente. Os minérios ricos ou com teores elevados chegam a até 80% de vermiculita.

Ao contrário de outros minerais, o valor de um minério de vermiculita depende da distribuição e da eficiência do aproveitamento das partículas maiores do mineral. Portanto, exige-se, cada vez mais, métodos de lavra capazes de proporcionar um produto lavrado com partículas grossas.

Nos depósitos de vermiculita, é comum a ocorrência do mineral nos seguintes modos: mica parcialmente alterada em vermiculita, vermiculita alterando para caulinita e vermiculita associada aos minerais de ganga. Tais ocorrências têm efeitos significativos nos métodos de lavra e processamento. Assim, normalmente, pratica-se lavras seletivas do mineral com o objetivo de obter um produto final com granulometria mais grossa possível e elevado teor de vermiculita, facilitando as operações de beneficiamento para obtenção de um produto final com maior valor agregado. Como as jazidas de vermiculita relativamente puras são escassas e a demanda por vermiculita grossa aumenta cada vez mais, torna-se uma exigência o processamento de minérios com qualidade menos nobre, muito embora existam depósitos com elevado teor de vermiculita grossa e livre de contaminação. Dessa forma, há uma tendência pelo uso de técnicas avançadas de sondagens e lavra em harmonia com as características do corpo de jazida.

Na prática, é comum a lavra de vermiculita a céu aberto, e são raros os casos de lavra subterrânea. Nas minas modernas, a abertura de cavas, geralmente rasas, cerca de 50 m, é feita com equipamentos convencionais incluindo, entre outros, escavadeiras mecânicas, onde as jazidas de vermiculita estão associadas aos diques, sills e/ou outros corpos rochosos e compactos.

Em geral, o processamento do minério lavrado é feito na própria mina, todavia há casos, característicos de pequenas jazidas, em que a usina de processamento situa-se a maiores distâncias da mina. Desse modo, o transporte é realizado por caminhões de pequeno porte, em auto-estrada. Nas duas

situações, há sempre a remoção de uma quantidade significativa de material estéril.

No Brasil, o minério de vermiculita é lavrado a céu aberto com desmonte mecânico, utilizando trator de esteira na etapa de escarificação. O minério bruto é retomado por carregadeira frontal para abastecer os caminhões basculantes, que fazem o transporte até a usina de concentração. As bancadas possuem, como de hábito, largura média de 3,0 m e talude de 30^o, o que permite a operação dos equipamentos de desmonte e transporte. Tal procedimento pode variar de acordo com a espessura da camada de minério no jazimento.

A remoção do capeamento com espessura média de 1,5 m também é feita com auxílio do trator de esteira. O plano de lavra prevê o retorno do capeamento à cava da mina, de forma a recompor a topografia original do terreno. O capeamento é constituído, basicamente, de material argiloso de fácil remoção; a relação estéril/minério situa-se na faixa de 0,063/1 (Luz et al., 2001).

Processamento

Os minérios e concentrados são normalmente analisados pelo teor de vermiculita e tamanho das partículas. A amostra seca é peneirada em várias frações, segundo a classificação granulométrica ilustrada na Tabela 3, que exemplifica a diferença entre a granulometria dos padrões de concentrados de vermiculita natural, internacional, americano e brasileiro. Cada fração é pesada, e então, submetida ao processo de expansão térmica em fornos com temperatura na faixa de 800 a 1.100°C. Após o resfriamento, a vermiculita expandida é novamente pesada, e a ganga residual é removida por meio de separação a seco ou a úmido, esta última menos utilizada. O concentrado de vermiculita é calculado segundo:

- (i) a simples diferença da massa entre a vermiculita expandida e os minerais de ganga;
- (ii) o cálculo do excesso de umidade;
- (iii) a sobresecagem do produto.

O teor de vermiculita nos concentrados finais varia desde 90 até 99%. Os concentrados são também especificados em função do desempenho do material durante o processo de expansão térmica, o qual pode ser avaliado em teste de laboratório que simula o processo industrial. Nas unidades produtoras,

rotineiramente, a avaliação da vermiculita expandida é feita segundo a pesagem do produto acondicionado em sacos de 100 L.

As técnicas de beneficiamento de vermiculita fazem uso das vantagens de uma ou mais propriedades do mineral. Tais propriedades incluem: forma, densidade, resistência à cominuição, entre outras. Algumas destas propriedades podem ser aplicadas em processos a seco e a úmido, entretanto, nas unidades produtoras, há predominância da utilização do método a seco.

Em geral, os minerais de ganga são friáveis, e quando passam por equipamentos de cominuição, britadores de impactos ou de rolos, são cominuídos seletivamente em relação à vermiculita, que permanece praticamente intacta. Mais da metade dos minerais de ganga é reduzida a uma granulometria adequada à sua remoção, no classificador pneumático.

Tabela 3 – Classificação granulométrica de padrões de concentrados de vermiculita natural (Reis, 2002).

Padrão Internacional	Tamanho (mm)	Padrão Americano	Tamanho (mm)	Padrão Brasileiro	Tamanho (mm)
Grossa	-8,0 + 2,8	1	-7,0 + 3,327	-	-
Média	-4,0 + 1,4	2	-3,5 + 1,75	Média	55-95% > 2,4
Fina	-2,0 + 0,71	3	-2,0 + 0,6	Fina	65-95% > 1,2
Superfina	-1,0 + 0,355	4	-0,85 + 0,212	Superfina	70-95% > 0,6
Micrometro	-0,71 + 0,25	5	-0,3	Micrometro	80-100 > 0,3

Constam, na Figura 2, duas ilustrações de fluxogramas genéricos utilizados na obtenção de concentrados de vermiculita. O processamento a seco requer uma etapa de secagem antes do processo de separação. Em geral, utiliza-se um sistema de aeroclassificação no beneficiamento, por meio de um classificador pneumático e outras técnicas como mesa pneumática, esta com menor índice de utilização. As separações eletrostática e magnética são usadas apenas em alguns casos. Quando há biotita no minério, esta pode ser removida por separação magnética. A seletividade da classificação pneumática promove a obtenção de concentrados de vermiculita com faixas granulométricas estreitas, razão pela qual esses equipamentos são utilizados com mais frequência.

O beneficiamento a úmido, com menor número de aplicações, geralmente é feito segundo duas linhas de processo:

- (i) flotação da fração fina entre 250 e 75 μm , usando ácido oléico e linoléico, após a cominuição, classificação e deslamagem;
- (ii) técnicas convencionais de beneficiamento baseadas na morfologia ou densidade das partículas maiores.

Uma vez que muitos dos minérios de vermiculita contêm maiores quantidades de minerais de ganga com densidade elevada, há a possibilidade de aplicação, com êxito, do processo de separação por meio denso, jigues e mesas vibratórias. Dependendo do caso, apenas uma simples hidroclassificação pode ser efetiva na separação da vermiculita fina. Em alguns casos, há a possibilidade de substituir a flotação por classificadores hidráulicos.

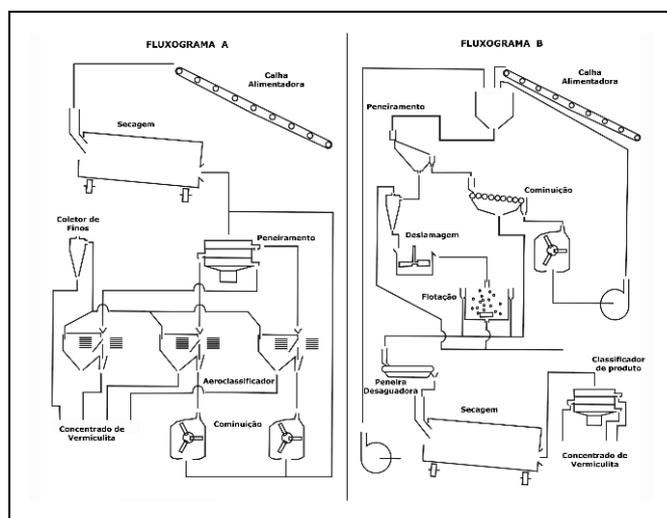


Figura 2 – Processos genéricos de beneficiamento a seco (Fluxograma A) e a úmido (Fluxograma B) para obtenção de concentrados de vermiculita natural (Hindman, 1994).

No Brasil, há predominância da utilização do processo a seco para concentração de vermiculita. O minério lavrado é exposto ao sol para secagem até uma umidade de 4%, ideal para a alimentação do processo, que é baseado em etapas de moagem, em moinhos de martelo, e peneiramento, para obtenção de concentrados com diferentes frações granulométricas. A fração fina (pó) abaixo de 0,5 mm é descartada do circuito por meio de correia transportadora. Ao final dessas etapas, os concentrados com teor médio de vermiculita de 70% são obtidos por classificação pneumática, utilizando classificadores pneumáticos de sucção (winovers) (Luz et al., 2001). A Figura 3 ilustra os fluxogramas dos processos de beneficiamento a seco para a obtenção de

Embora a vermiculita seja comercializada na sua forma natural, a sua utilização se faz, na maioria das vezes, na forma expandida. Na forma natural, a vermiculita é utilizada na fabricação de placas de isolantes em recobrimento de paredes e outros usos limitados (Ellicot, 2000). Antes de citar os usos da vermiculita na forma expandida, é interessante conhecer alguns detalhes sobre o processo de esfoliação ou expansão térmica.

O processo consiste no aquecimento do concentrado de vermiculita por meio de fornos especiais, a gás ou a óleo, a uma temperatura na faixa de 800 a 1.100°C. O objetivo do processo consiste em remover a água estrutural associada ao mineral, no menor intervalo de tempo possível, com o melhor rendimento do processo. O aquecimento converte, bruscamente, a água interlamelar em vapor, expandindo a vermiculita natural. Esse processo confere aos produtos resistência ao fogo, propriedades isolantes térmicas e acústicas, adesão, resistência à formação de rachaduras e enrugamentos, esterilidade e também elevada absorção de líquidos, devido à sua porosidade também elevada (França e Luz, 2002). As Figuras 4 (a) e (b) são fotografias de vermiculita natural e expandida, respectivamente.

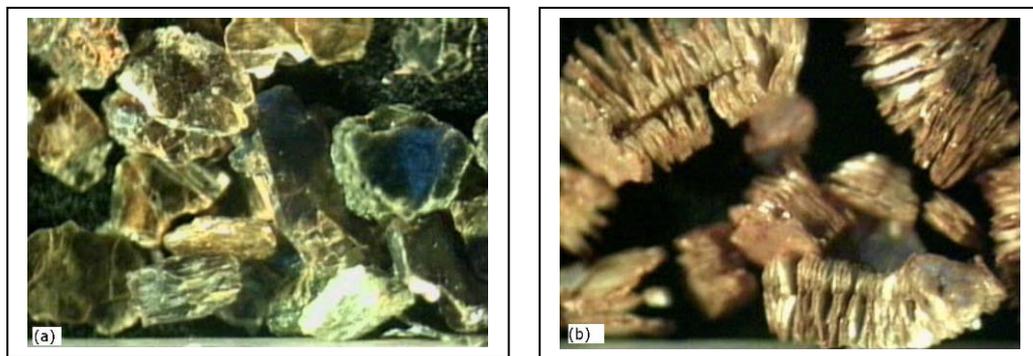


Figura 4 – Fotografias de amostras de vermiculita (Santa Luzia, PB): (a) vermiculita natural; (b) vermiculita expandida (Ugarte et al., 2004).

Quando se aquece o mineral até a temperatura de 150°C, se remove apenas a água responsável pela umidade. Este é um processo reversível, isto é, as situações de equilíbrio retornam nas condições de temperatura e pressão. Na faixa de temperatura que vai desde 150 até 250°C, elimina-se a água quimicamente ligada à vermiculita. Finalmente, na faixa de temperatura entre 250 e 1.100°C, ocorre o processo de remoção da água ligada à estrutura do mineral e, também, o processo de desidroxilação da vermiculita, considerados irreversíveis.

Teoricamente, a vermiculita pura expande até 30 ou 40 vezes o seu volume original, no entanto a vermiculita comercializada na forma natural expande, em média, de 8 a 12 vezes. É possível que fatores ligados a esta ocorrência sejam impurezas, assim como as características físico-químicas, principalmente a quantidade de moléculas de água livre ligadas à estrutura cristalina (Ugarte et al., 2004; Martins et al., 2001). A densidade aparente da vermiculita é reduzida de 640-960 kg/m³ para 56-192 kg/m³, quando se obtém um produto expandido com 90% em volume de ar aprisionado. No caso do produto expandido, a sua densidade e aparência dependem da:

- (i) temperatura e tempo de residência na zona de aquecimento;
- (ii) natureza oxidante ou redutora do ambiente de aquecimento, que é função do combustível utilizado.

As unidades produtoras de vermiculita expandida localizam-se próximo ao mercado consumidor, pois é mais vantajoso transportar a vermiculita natural do que aquela com um volume cerca de 12 vezes maior, média de expansão do produto.

4. USOS E FUNÇÕES

Em geral, a aplicação da vermiculita em cada uso específico depende da sua granulometria e pureza. Aquelas com granulometria mais fina são aplicadas na produção de manufaturados para a construção civil, além de utilizadas como carreadoras na produção de fertilizantes e de alimentos para animais. As de granulometria mais grossa são utilizadas para fins de horticultura, cultivo e germinação de sementes, dentre outros.

A vermiculita é um material não abrasivo, inodoro, não se decompõe, nem promove irritações na pele, possui propriedades isolantes, tanto térmica como acústica, não contém asbestos e é um material não carcinogênico.

Suas propriedades de superfície, em particular, área superficial, hidrofobicidade, porosidade e carga superficial negativa, fazem dela um material recomendado para uso como material absorvente e carreador. A vermiculita pode ainda ser aplicada na fabricação de embalagens industriais para controle da umidade, devido à sua baixa elasticidade e altas capacidades absorptivas e adsorptivas. Além disso, sua densidade baixa, cujos valores na forma natural variam entre 800 a 1.000 kg/m³ e na forma expandida ficam na faixa de 80 a 140 kg/m³, favorecem ainda mais essa utilização.

Na forma natural e expandida, o mineral possui propriedades catalíticas e, quando modificado por tratamento químico, poderá ser utilizado, com êxito, na remoção de resíduos nucleares, purificação de água, tratamento de esgotos tóxicos e assim por diante.

A seguir são relacionados os ramos da indústria nos quais a vermiculita é utilizada, principalmente na forma expandida, incluindo as especificações requeridas para cada aplicação e as expectativas de crescimento de mercado.

Vermiculita para a Indústria da Construção Civil

Dentre os principais usos na construção civil, está a sua aplicação como isolante térmico e acústico em paredes, na forma de massa para revestimento (reboco), graças à baixa condutividade térmica do material ($60 \text{ cal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$, a 25°C) e pequena propagação sonora (médias de coeficiente de redução de ruídos superior a 60%). Normalmente, utilizam-se argamassas com proporções conhecidas, em volumes. Neste segmento industrial, a vermiculita é usada nas granulometrias média, fina e superfina. Outros produtos de vermiculitas para aplicação na construção civil estão disponíveis no mercado e recebem denominações comerciais fornecidas por cada empresa (Brasil Minérios, 2007). Por exemplo, vermiplac, placas de aglomerado com dimensões métricas; vermibloc, blocos pré-moldados com argamassa gesso/vermiculita usados em divisórias internas; vermifloc é um agregado para argamassa de reboco, o mais usado é o sem fibra, cuja granulometria é adequada a um perfeito entrelaçamento dos grãos com 30% de redução do volume. Solto, pode ser aplicado no isolamento termo-acústico de forros, assoalhos e paredes, bem como na cobertura de abóbadas de fornos e estufas. A mistura de vermifloc com cimento portland e água proporciona a obtenção de um concreto leve, cuja resistência à compressão pode chegar a 0,7 Mpa.

Para cada uso, deve ser adotada uma proporção conveniente entre as quantidades de vermifloc e cimento, atendendo sempre à relação densidade/resistência à compressão. Neste caso, as densidades se referem ao material compacto e seco, e as misturas são fornecidas já prontas, secas, embaladas em sacos de 40 kg, sob o nome de vermimassa. Outras aplicações na construção civil: placas de aglomerado com miolo de chapas metálicas para uso como divisórias; impermeabilizante em lajes de cobertura e massas antifogo para paredes, teto e portais.

Vermiculita para a Horticultura

O mineral expandido, com granulometria média, fina e superfina, possui características especiais que o transformam num importante elemento na composição dos fertilizantes e formação dos solos para a horticultura, principalmente nos períodos de estiagem. Essas características fazem da vermiculita um importante aliado na produção e plantio de mudas, em reflorestamentos de grandes áreas, em horticultura e jardinagem, um inibidor de micro e macro nutrientes de adubos, estimulador da germinação de sementes etc. Ainda nessa linha podem ser destacadas outras características da vermiculita, tais como:

- (i) a vermiculita expandida é muito leve, o que facilita o seu manuseio nas composições com solos, turfas, cascas de pinho, fertilizantes, pesticidas e herbicidas;
- (ii) a vermiculita promove a areação do solo, enquanto retém umidade e estimula a absorção de nutrientes através das raízes das plantas;
- (iii) suas capacidades de trocas catiônicas disponibilizam amônia, potássio, cálcio para as plantas;
- (iv) quando combinada com turfa ou com casca de pinho promove o rápido crescimento das raízes das plantas, além de reter ar e umidade, liberando-os para a planta quando necessário.

A vermiculita na forma expandida, por auxiliar na correção do pH, constitui-se também num ótimo condicionador de solos ácidos e argilosos, tornando-os mais soltos, porosos e arejados, de forma a proporcionar um melhor desenvolvimento nas raízes das plantas. Além disso, é um excelente retentor de umidade (Potter, 2001). Comercialmente, são encontrados no mercado produtos com as denominações *rendmax* ou *vermissolo*, que são flocos utilizados na horticultura para retenção de água ou a substituição de solo para a produção de mudas e plantas em grande escala. A linha *Bio-Foby* (vermiculita expandida *vermifloc* e o *Bioinseticida Bt-hours SC*) (Brasil Minérios, 2007) é aplicada no combate e controle de lavras de criadouros de insetos da espécie *Aedes Aegypti*, transmissores da dengue e da febre amarela.

Outras Aplicações

Na forma fina (abaixo de 40 μm), a vermiculita é muito utilizada como carga na indústria de tintas, fabricação de pneus e pastilhas de freio para a

indústria automobilística. O atrativo dos produtos expandidos de granulometria fina deve-se também ao crescente consumo no segmento de aplicativos como pastas e lubrificantes inertes, não graxosos, que, por suas características físico-químicas, substituem derivados de petróleo e grafita, chegando a valer 50% a mais sobre o preço das vermiculitas de granulometria fina e superfina. É também muito utilizada: na produção de tijolos refratários, blocos e placas resistentes a altas temperaturas; na proteção de estruturas de aço a temperaturas elevadas; no aumento da viscosidade de óleos lubrificantes e como ingredientes de compostos de vedação de juntas de dilatação; na fabricação de isolantes térmicos têxteis; isolantes termo-acústicos para construção naval (cascos de barcos e canoas); em embalagens à prova de choque e fogo; em isolante de câmaras frias; como carga na formulação de fibra de vidro; em revestimento de moldes para fundição de ferro e alumínio; em lubrificante de junções de trilhos durante ajuste térmico; na absorção de óleos, pesticidas e metais pesados.

Além das aplicações citadas anteriormente, o mineral vermiculita é estudado em centros de pesquisas do País e do exterior, para que se promovam mais ações em prol do aproveitamento e de seu potencial para uso no mercado (Neto e Ugarte, 2007; Ugarte e Monte, 2005 A; Martins et al., 2001; França et al., 2005; Santos e Masini, 2007).

No Brasil, o mercado de aplicativos ainda é incipiente, mas indica um crescimento significativo. Além disso, dependendo de sua capacidade de ampliar a produção, o Brasil poderá, no futuro próximo, produzir concentrados de vermiculita visando aumentar suas exportações para os mercados americano e europeu.

A seguir são exemplificadas outras aplicações da vermiculita na forma natural, impulsionadas por algumas de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, a saber (Lin, 1998):

- (i) insumo em materiais cerâmicos - utilizam-se os componentes magnésio, alumina, sílica e ferro da vermiculita, uma vez que é uma matéria-prima de composição uniforme e baixo teor de impurezas;
- (ii) fabricação de explosivos - utilizada devido às propriedades da água estrutural na vermiculita natural;
- (iii) carga em indústrias de tintas - utilizada como carga na confecção de agregados, plásticos, concretos e tintas de alta plasticidade;

- (iv) confecção de pedras artificiais - utilizam-se alguns componentes químicos da vermiculita na confecção de pedras semipreciosas para a indústria joalheira e de ornamentos;
- (v) materiais à prova de fogo - a vermiculita é utilizada como uma massa selante, para poros e tubulações, que, na presença do calor (por motivo de fogo), se expandem, vedando, também, a fumaça e o excesso de calor.

5. ESPECIFICAÇÕES

A comercialização dos produtos da vermiculita é baseada na sua granulometria superfina, fina e média, que é dependente do tipo de aplicação. Desse modo, a uniformidade no fornecimento de uma matéria-prima, com características químicas e físicas constantes, constitui-se na tarefa principal para os fornecedores desses insumos minerais. De uma forma geral, os consumidores de concentrado de vermiculita seguem as seguintes especificações (Brasil Minérios, 2007):

- (i) concentrado de tonalidade cinza claro ou cinza e bege claro, quando expandido;
- (ii) características de expansão aceitas pela indústria (fator de expansão >10 vezes) com menor temperatura de expansão;
- (iii) concentrado com 90% de vermiculita, livre de asbestos e baixo teor de sódio;
- (iv) as lamelas deverão estar 80% dentro do tamanho solicitado;
- (v) os concentrados devem possuir capacidade de troca catiônica (CTC) elevada, valores acima de 100 meq/100 g.

A especificação da composição química da vermiculita da Phalaborwa Mining Company (África do Sul), apresentada na Tabela 4, é empregada em vários setores industriais, tais como: revestimento antifogo, revestimento de fricção de freios e embreagens de automóveis, construção civil, isolante térmico e embalagens de materiais.

Devido ao grande aumento de volume após a expansão, o concentrado de vermiculita é transportado na forma natural. O produto expandido é obtido em unidades de beneficiamento próximas ao mercado consumidor. Existem mais de

60 unidades industriais de esfoliação espalhadas pelo mundo, localizadas na América do Norte e na Europa.

Tabela 4 – Especificação da vermiculita da Phalaborwa Mining Company (www.palabora.co.za).

Composto químico	Porcentagem	Composto químico	Porcentagem
SiO ₂	35-41	CO ₂	0,6-2,5
Al ₂ O ₃	6,0-10,0	TiO ₂	0,6-1,4
Fe ₂ O ₃	6,0-9,5	F	0,2-0,8
MgO	21,5-25,5	Cr ₂ O ₃	0,01-0,10
K ₂ O	3,0-6,0	P ₂ O ₅	0,2-2,0
CaO	2,0-6,0	Cl	0-0,5

No Brasil, as unidades de esfoliação estão localizadas nos estados de São Paulo, Belo Horizonte, Goiás e Piauí. A reestruturação do beneficiamento dos produtos de vermiculita tornou o estado de Goiás o principal produtor.

Os concentrados de vermiculita são exportados para os Estados Unidos e Europa na forma natural. No mercado interno, os aplicativos de vermiculita são ainda limitados, com oferta de produtos restritos a setores industriais de produtos manufaturados, como, por exemplo, para a construção civil nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Porto Alegre. Os maiores consumidores de vermiculita na forma expandida, no Brasil, são os setores da construção civil (cerca de 76,0% da quantidade produzida) e agricultura, particularmente na horticultura, destacando-se a cidade de Holambra, no estado de São Paulo (Cavalcanti, 2007).

6. MINERAIS E MATERIAIS ALTERNATIVOS

A vermiculita expandida pode ser substituída por diferentes materiais, dependendo do uso final do produto. Na confecção de peças de concreto leve e revestimento para paredes e tetos, pode ser substituída pela perlita expandida. Ainda nestas aplicações, pode-se encontrar o uso de materiais de menor custo, porém mais densos que a perlita expandida, ou seja, algumas argilas, silte e outros minerais argilosos intemperizados. Em mistura com gesso, promove maior resistência à abrasão e quebras e pode ser utilizada em painéis e divisórias (Lin, 1998).

Na aplicação como isolante térmico e acústico, a vermiculita expandida tem como competidores a fibra de vidro, a perlita e a lã de escória (Potter, 2002). Na agricultura, os materiais concorrentes são a turfa, a perlita e a serragem, além de outros condicionadores de solos sintéticos. Atualmente, materiais como perlita, lã mineral e poliestireno mostram-se competidores crescentes da vermiculita em diversos usos, tanto em termos de preços quanto de qualidade esperada no seu uso final (Ellicott, 2000).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M. R. M. P. e NOVAES, A. C. (2002). Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. *Química Nova*, vol. 25, nº. 6B, p. 1145-1154.
- BETTENCOURT, J. S. e MORESCHI, J. B. (2000). Recursos Minerais. In: *Decifrando a Terra*, vol. 1, Cap. 21. TEIXEIRA, W., TOLEDO, M. C. M., FIRCHILD, T. R., TAIOLI, F., (editores), Oficina de Textos.
- BIGHAM, J. M., BHATTI, T. M., VUORINEN, A. e TUOVINEN, O. H. (2001). Dissolution and structural alteration of phlogopite mediated by proton attack and bacterial oxidation of ferrous iron. *Hydrometallurgy*, 59, p. 301-309.
- BIRKETT, T. C. e SIMANDI, G. J. (1999). Carbonatite-associated deposits: magmatic, replacement and residual. *Industrial Minerals*, vol. 3, p. 108-113.
- BRASIL MINÉRIOS, (2007). Informações obtidas na internet no endereço eletrônico: (<http://www.brasilminerios.com.br>). Acesso em: maio de 2007.
- CAVALCANTI, E.E. (2007). Sumário Mineral, DNPM.
- ELLICOT, G. (2000). Crude vermiculite: producers and refined market. *Industrial Minerals*, p. 21-27.
- HINDMAN, J. R. (1994). Vermiculite. In: *Industrial Minerals and Rocks*, 6th Edition, D. D. Carr (Senior Editor), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, p. 1103-1111.
- FRANÇA, S. C. A., UGARTE, J. F. O, ARRUDA, G. M. (2005). Vermiculite Utilization on Treatment of Water Contaminated With Organic Compounds In: 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, Rio de Janeiro.

- FRANÇA, S. C. A. e LUZ, A.B. (2002). Utilização da vermiculita como adsorvente de compostos orgânicos poluentes da indústria do petróleo. In: XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Recife, p. 547-553.
- JINYAO, L. (2001). Chinese vermiculite: A new source for the world market. *Industrial Minerals*, vol. 403, p. 65-67.
- LIN, I. (1998). Perlite & Vermiculite: Crudely speaking, the potential is good. *Industrial Minerals*, vol. 368, p. 55-59.
- LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., OLIVEIRA, J. A. e CASTRO, O. E. G. (2001). Vermiculita: UBM-União Brasileira de Mineração. In: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil, J. A. Sampaio, A. B. Luz e F. A. F. Lins (editores), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 398 p., p.377-382.
- MARTINS, J., MACHADO, L. C. R., MARCOS, C. e ZACARIAS, C. M. (2001). Caracterização tecnológica de vermiculitas brasileiras. In: VI Southern Hemisphere Meeting On Mineral Technology, vol. 3, Rio de Janeiro, p. 8-12.
- MARKE, G. M. (1981). The polabara complex – triumph over low grade ores. *Industrial Minerals*, 169, p. 45-62.
- NETO, R. P. C. e UGARTE, J. F. O. (2007). Utilização de Vermiculita em Sistema Dessalinizador com Colunas Percoladas . In: XIV Jornada de Iniciação Científica – CETEM.
- MUÑOZ, L.S. e CASTELLÓ, J.B.C. (2003). Materias Primas y Aditivos Cerámicos, *Enciclopedia Cerámica*, vol. 2, 1ª Ed. Editora Faenza Ibérica S.I.
- SANTOS, A. L. V. e MASINI, J. C. (2007). Evaluating the removal of Cd(II), Pb(II) and Cu(II) from a wastewater sample of a coating industry by adsorption onto vermiculite. *Applied Clay Science*, 37, p. 167-174.
- SIMANDI, G. J., BIRKETT, T. e PARADIS, S. (1999). Vermiculite. *Industrial Minerals*, vol. 3, pp. 113-117.
- POTTER, M. J. (2001). Vermiculite. U. S. Geological Survey, *Minerals Yearbook*. p. 82.1-82.3.

- POTTER, M. J. (2002). Vermiculite. U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. p. 184-185.
- REIS, E. (2002). Vermiculita no Brasil – Situação atual. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE).
- TANNER JR., J. T. (1994). Mica. In: Industrial Minerals and Rocks, 6th Edition, D. D. Carr (Editor), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc: Littleton, Colorado, p. 693- 710.
- UGARTE, J. F. O., MONTE, M. B. M., FRANÇA, S. C. A. e GRACIANO, F. P. R. (2004). Comparação estatística do fator de expansão de concentrados de vermiculita. In: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. vol. 1, Florianópolis, p. 201-208.
- UGARTE, J. F. O. e MONTE, M. B. M. (2005 A). Adsorção e Dessorção de Óleo em Vermiculita. In: XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa - ENTMME, Natal - RN. Anais do evento.
- UGARTE, J. F. O. e MONTE, M. B. M. (2005 B). Estudo da Vermiculita como Adsorvente de Óleo e Cobre em Solução. In: XLV Congresso Brasileiro de Química, Belém – PA. Anais do evento.