

CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DA ROCHA AEGIRINA-NEFELINA-MICROSIENTO PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA CERÂMICA

Sydney Sabedot ¹

Alexandre Ritter Volkmann ²

Carlos Hoffmann Sampaio ³

Resumo

Caracterização mineralógica e processamento mineral foram atividades aplicadas na rocha aegirina-nefelina-microsienito para se definir uma rota viável à produção de matéria-prima usada como fundente na indústria cerâmica, a qual deverá apresentar teor de $Fe_2O_3 \leq 0,65\%$, para a fabricação do piso grês-porcelanato. Feldspatos alcalinos e feldspatóides são os minerais essenciais; piroxênios e anfibólios são os principais acessórios. O grau de liberação foi avaliado em processo de afunda-flutua em líquido denso. A seletividade não foi boa no processo, mas os resultados indicaram que tende a aumentar com a redução da faixa granulométrica. Amostras cominuídas e peneiradas foram submetidas à separação magnética a seco e à flotação associada com separação magnética a úmido. Foram as rotas escolhidas para se obter a matéria-prima desejada. A rota identificada como técnica e economicamente viável foi a separação magnética a seco, que gerou produtos com teores de Fe_2O_3 adequados ao porcelanato, na granulometria -1,0 +0,15 mm.

Palavras-chave: Processamento mineral; Porcelanato; Tecnologia mineral.

CHARACTERIZATION AND PROCESSING OF THE AEGIRINE-NEPHELINE-MICROSYENITE ROCK FOR APPLICATION IN THE CERAMIC INDUSTRY

Abstract

Mineralogical characterization and mineral processing were applied activities in the rock aegirine-nepheline-microsyenite to define a viable route in the production of the raw material used as fluxing agent in the ceramic industry, which should have Fe_2O_3 content $\leq 0.65\%$, for the production of the *grês-porcelanato* floor. Alkaline feldspars and feldspathoids are the essential minerals; pyroxenes and amphibolies are the main accessories minerals. The liberation degree was evaluated in the floats and sink process with dense liquid. The selectivity was not good in the process, but the results indicated that it tends to increase with the grains sizes decrease. After that, evaluating purification processes using dry and wet magnetic separation and flotation techniques was carried out in milled and sized samples. These processes were the chosen routes to obtain the wanted raw material. The route identified as technique and economically viable it was the dry magnetic separation, that it generated products with Fe_2O_3 content appropriate to the *porcelanato*, in the -1,0 to +0,15 mm grain size range.

Key words: Mineral processing; Mineral technology.

I INTRODUÇÃO

A empresa Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda. opera em áreas de ocorrência das rochas fonolito e nefelina-sienito, no município de Lages, Planalto Serrano de Santa Catarina, extraindo e beneficiando matéria-prima fundente para os segmentos cerâmico,

vidreiro, siderúrgico e químico, entre outros.

Alguns minerais contêm ferro em suas estruturas e são caracterizados como contaminantes das matérias-primas processadas, por interferirem desfavoravelmente na cor e no valor comercial do produto final. Assim, a rocha extraída pela empresa não pode ser comercializada *in natura*, exigindo uma rota de processamento para eliminar ou diminuir a quantidade daqueles minerais.

¹ Doutor, professor e pesquisador do UNILASALLE

² Mestre, gerente de mina da Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda.

³ Pós-Doutor, professor adjunto do Departamento de Metalurgia da UFRGS

Neste estudo, os objetivos foram a caracterização mineralógica e o desenvolvimento de rotas de beneficiamento da aegirina-nefelina-microsienito, que pudessem viabilizar técnica e economicamente a remoção de minerais contaminantes da rocha e a produção de uma matéria-prima fundente adequada para a indústria cerâmica de revestimentos nobres, tipo porcelanato.

A rocha aegirina-nefelina-microsienito é uma variedade da rocha regionalmente conhecida como nefelina-sienito, que pertence ao Complexo Alcalino de Lages, o qual constitui uma série de intrusões alcalinas irregulares e forma uma região dômica com cerca de 30 km de diâmetro, onde as unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná estão afetadas. Os aspectos morfoestruturais, associados ao sistema anelar de falhamentos, indicam um levantamento dômico pré-Botucatu e atividade vulcânica principal pós-Botucatu.⁽¹⁾

O processo mais comum para a separação dos minerais de ferro de rochas feldspáticas é a separação magnética.⁽²⁾ Minerais escuros, como a magnetita, biotita, hornblenda, aegirina, pirita e turmalina são removidos. Se a operação não remove esses minerais com eficácia, melhoramento adicional pode ser obtido por processo de flotação.⁽³⁾

Nos processos cerâmicos, os feldspatos, o fonolito e a nefelina-sienito atuam como fundentes, auxiliando na formação da fase vítrea, tanto na massa cerâmica (biscoito), como no acabamento (vitrificação superficial). Também auxiliam na formação do biscoito através de uma fusão parcial e posterior vitrificação, cimentando, assim, os componentes mais refratários e os constituintes maiores parcialmente fundidos, numa massa cerâmica única endurecida.⁽⁴⁾

O porcelanato é um tipo importante de placa cerâmica para revestimento, devido às ótimas propriedades técnicas (baixa absorção de água, alta resistência mecânica e à abrasão e ótima resistência química ao gelo) e sua semelhança com as rochas naturais. Surgiu na Itália na década de 70, e na década de 90 sua produção cresceu acentuadamente, quando passou a ser fabricado em ciclo rápido de queima.⁽⁵⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

A empresa opera a Jazida do Tributo, na borda sul do Domo Alcalino de Lages, que corresponde a matacões e seixos rolados de rochas alcalinas, imersos em solo areno-argiloso derivado da alteração destas. Em amostra de mão, a rocha, de cor cinza, apresenta textura porfirítica formada por fenocristais de feldspatos, feldspatóides e minerais ferromagnesianos distribuídos em matriz fina (Figura 1). Externamente, apresenta uma fina capa de alteração, de dimensões milimétricas, de cor branca, constituída por caulinita. Este foi o material utilizado nesta pesquisa, em amostras de rocha retiradas da frente de lavra, nas quais se desenvolveram atividades de caracterização mineralógica e ensaios de beneficiamento.

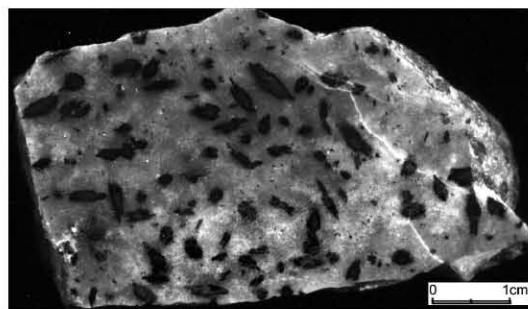


Figura 1. Textura porfirítica da rocha aegirina-nefelina-microsienito.

2.1 Caracterização Mineralógica

Fragmentos da rocha são enviados ao Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que realizou microscopia óptica em lâminas delgadas da rocha.

2.2 Ensaios de Beneficiamento

Os ensaios de beneficiamento foram divididos em três etapas: afunda-flutua com líquido denso, separação magnética a seco e flotação associada com separação magnética a úmido.

2.2.1 Afunda-flutua com líquido denso

Uma amostra de frente de lavra foi enviada ao Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), da UFRGS, que providenciou a cominuição (< 3,0 mm) da mesma em um moinho de rolos, de laboratório. A massa resultante foi peneirada nas malhas 2,0 mm, 1,4 mm, 1,0 mm, 0,6 mm, 0,25 mm e 0,15 mm. As frações granulométricas (exceto +2,0 mm e -0,15 mm) foram submetidas a ensaios de afundaflutua, com bromofórmio. A operação resultou em duas frações minerais (leves e pesadas), enviadas ao laboratório da empresa Lakefield Geosol Ltda., para as análises químicas dos óxidos, por fluorescência de raios x.

2.2.2 Separação magnética a seco

Outra amostra de frente de lavra foi cominuída (< 3,0 mm) em um moinho de rolos, industrial. A massa resultante foi peneirada nas mesmas malhas acima citadas. As frações granulométricas (exceto +2,0 mm e -0,15 mm)

foram processadas em um separador magnético ReRoll (terras raras), de rolo simples, marca Improsys, com um campo magnético próximo a 20.000 Gauss. O produto não-magnético de cada fração foi repassado no equipamento. Estas operações foram realizadas na empresa Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda. Amostras do produto não-magnético dos repasses também foram analisadas no laboratório da Lakefield Geosol Ltda.

2.2.3 Flotação associada com separação magnética a úmido

Nova amostra foi cominuída (< 3,0 mm) em um moinho de rolos, industrial. A massa resultante foi quarteada em duas alíquotas: a alíquota 1 foi peneirada em malha 0,25 mm; a alíquota 2 em malha 0,15 mm. Os ensaios foram realizados na fração -0,25 mm da alíquota 1 e -0,15 mm da alíquota 2. Cada fração foi quarteada em três subalíquotas: uma para os ensaios de flotação, outra para os ensaios de separação magnética a úmido e outra para as análises químicas.

A flotação foi operada em uma célula Denver, de bancada, modelo D12, usando-se oleato de sódio como coletor, na dosagem de 400 g/t, e óleo de pinho como espumante, na dosagem de 50 g/t, em polpa a 25% de sólidos e pH de 8,4. O tempo de condicionamento foi três minutos, o de flotação foi quatro minutos, à rotação de 1.200 rpm. Na operação, a subalíquota passou por um circuito *rougher*; o concentrado deste passou por um circuito *scavenger*. Uma amostra do concentrado do circuito *scavenger* foi processada no separador magnético a úmido, para se comparar resultados obtidos entre amostras processadas neste equipamento, com e sem flotação prévia.

Para a separação magnética a úmido, utilizou-se um separador eletromagnético de alta intensidade, marca Inbrás-Eriez, operado com intensidade magnética em torno de 20.000 Gauss

(gap fechado), de cânister fixo e preenchido com tela expandida de dimensões 1 mm x 1 mm.

Os ensaios foram realizados no LAPROM. Os produtos e subprodutos derivados, nos dois processos, foram analisados na Lakefield Geosol Ltda.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização Mineralógica

Na microscopia óptica, as lâminas delgadas indicaram uma condição predominantemente inequigranular, decorrente de variações abruptas nas dimensões dos grãos da matriz e dos megacristais de minerais máficos.

A mineralogia essencial é constituída por feldspato alcalino e feldspatóide, sendo os máficos piroxênio alcalino, anfibólio alcalino e biotita, associados a uma mineralogia acessória com zircão, apatita, titanita e minerais opacos. A Tabela 1 mostra a composição mineralógica média das amostras de rocha analisadas.

O feldspato alcalino ocorre restrito à matriz, nas formas subédrica a euédrica com um hábito tabular alongado e dimensões da ordem de 0,1 a 0,6 mm. O feldspatóide ocorre restrito à matriz como nefelina e mais raramente noseana. A nefelina possui forma predominantemente subédrica, com tamanho médio de 0,2 mm. O clinopiroxênio ocorre predominantemente na forma de megacristais subédricos com dimensões que variam de 6 mm a 1 cm. Quando na condição de constituinte da matriz possui formas subédricas a euédricas com dimensão média de 1,2 mm. Os grãos possuem pleocroísmo com np = verde-esmeralda, nm = verde e ng = castanho-amarelado, ângulo de extinção de 4°: Z e um 2V médio a grande, negativo, que permite identificá-los como do grupo dos piroxênios alcalinos, provavelmente aegirina. O anfibólio ocorre na matriz como grãos anédricos de astrofilita com pleocroísmo de tons vermelho-amarelados. E como produto da transformação do clinopiroxênio ao longo das divagens e das bordas dos grãos. Os minerais opacos ocorrem como massas microgranulares, produto da transformação das fases máficas. A apatita ocorre como diminutos grãos euédricos, com seções basais hexagonais típicas e laterais tabulares alongadas, em geral inclusa em clinopiroxênio. O zircão é uma fase tardia e ocorre como grãos anédricos ou com hábito prismático alongado, sendo comum irregularidades internas decorrentes, provavelmente, da metamitização. O material de baixa temperatura está representado por zeólitas, que cristalizam em raras cavidades miarolíticas.

As características mineralógicas e texturais da rocha analisada permitem identificá-la como uma aegirina-nefelina-microsienito. A Figura 2 mostra fotomicrografias de lâminas delgadas da rocha. Em "a" são mostrados feldspatos alcalinos (Fa), feldspatóides (Fd) e seções basais de aegirina (Ae). Em "b", além dos citados minerais, também aparece um grão anédrico de astrofilita (Ast) em contato reto com a aegirina.

Tabela 1. Composição mineralógica da rocha analisada.

Mineral	%
Feldspato alcalino	43
Feldspatóide	32
Piroxênio	14
Anfibólio	1
Zircão + Apatita + Opacos	2
Cancrinita	7
Argilominerais	1
Zeólita	<<1

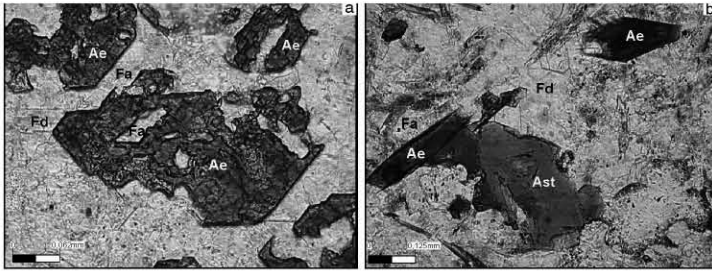


Figura 2. Fotomicrografias da aegirina-nefelina-microsienito em luz natural.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de afunda-flutua com o uso de bromofórmio.

Amostra	Massa (%)				
	Afunda-flutua				
	Leves	% Fe ₂ O ₃		Pesados	% Fe ₂ O ₃
+2,0 mm	0,1	-	-	-	-
-2,0 + 1,4 mm	16,0	15,96	2,1	0,04	-
-1,4 + 1,0 mm	14,1	13,89	1,9	0,21	11,2
-1,0 + 0,6 mm	14,9	14,47	1,6	0,43	12,4
-0,6 + 0,25 mm	16,9	15,89	1,2	1,01	14,2
-0,25 + 0,15 mm	7,0	6,65	1,4	0,35	16,7
-0,15 mm	31,0	-	-	-	-

ROM → Fe₂O₃ = 1,9%

Tabela 3. Resultados dos ensaios de separação magnética a seco.

Amostra	Massa (%)								
	mag	misto	Passe						
			% Fe ₂ O ₃	não-mag					
				Repasse					
				mag	misto	não-mag			
						% Fe ₂ O ₃			
-2,0 + 1,4 mm	23,8	2,5	1,8	19,5	0,85	0,1	0,5	18,9	0,75
-1,4 + 1,0 mm	25,7	3,9	2,1	19,7	0,75	0,2	0,6	18,9	0,69
-1,0 + 0,6 mm	23,2	4,0	1,6	17,6	0,64	0,1	0,5	17,0	0,6
-0,6 + 0,25 mm	5,0	1,1	0,7	3,2	0,57	0,1	0,2	2,9	0,54
-0,25 + 0,15 mm	11,9	3,1	2,4	6,4	0,62	0,1	0,5	5,8	0,55
-0,15 mm	10,4	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 4. Resultados dos ensaios de flotação nas alíquotas 0,25 mm e 0,15 mm.

Amostra	Fração	Flotação				% Massa	% Fe ₂ O ₃	
0,25 mm	+0,25 mm					19,6	-	
	-0,25 mm					80,4	2,2	
		rougher	flotado				4,1	10,2
			concentrado				76,3	1,8
		scavenger	flotado	conc	18,2	5,1		
					58,1	0,71		
0,15 mm	+0,15 mm					48,4	-	
	-0,15 mm					51,6	2,2	
		rougher	flotado				6,1	9,9
			concentrado				45,5	1,0
		scavenger	flotado	conc	4,1	6,3		
					41,4	0,85		

Tabela 5. Resultados dos ensaios de separação magnética a úmido.

Fração	Flotação	Massa (%)				% Fe ₂ O ₃
		Original		Separação mag a úmido		
		% Fe ₂ O ₃				
-0,25 mm	sim	58,1 ⁽¹⁾	0,71	mag	25,3	1,0
				não-mag	32,8	0,51
	não	80,4 ⁽²⁾	2,2	mag	34,7	4,0
				não-mag	45,7	0,86
-0,15 mm	sim	41,4 ⁽³⁾	0,85	mag	18,6	1,0
				não-mag	22,8	0,43
	não	51,6 ⁽⁴⁾	2,2	mag	22,2	3,5
				não-mag	29,4	1,0

⁽¹⁾ Concentrado do circuito scavenger da flotação (-0,25 mm), indicado na Tabela 4.

⁽²⁾ Fração -0,25 mm, indicada na Tabela 4.

⁽³⁾ Concentrado do circuito scavenger da flotação (-0,15 mm), indicado na Tabela 4.

⁽⁴⁾ Fração -0,15 mm, indicada na Tabela 4.

3.2 Ensaios de Beneficiamento

3.2.1 Afunda-flutua com líquido denso

A Tabela 2 mostra a distribuição granulométrica do material cominuído, o balanço de massas e os resultados da análise química de Fe₂O₃ para as frações de minerais leves e pesados dos ensaios de afunda-flutua.

3.2.2 Separação magnética a seco

A Tabela 3 mostra a distribuição granulométrica do material cominuído, o balanço de massas e os resultados da análise química de Fe₂O₃ para os produtos não-magnéticos, considerando o passe e o repasse no equipamento.

3.2.3 Flotação associada com separação magnética a úmido

Na Tabela 4, os resultados dos ensaios de flotação nas alíquotas 0,25 mm e 0,15 mm. Na Tabela 5, os resultados dos ensaios de separação magnética a úmido nas alíquotas 0,25 mm e 0,15 mm, submetidas, ou não, ao processo de flotação.

4 DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Mineralógica

Texturalmente, a rocha aegirina-nefelina-microsienito é compatível com uma condição hipabissal, tendo-se originado a partir de um sistema subsaturado em sílica, com conteúdos molares de Al₂O₃ inferiores a Na₂O + K₂O, que determinaram uma condição peralcalina e a estabilização de minerais máficos alcalinos. Magmas com estas características são comuns em ambientes continentais anorogênicos.

As lâminas delgadas mostram que os minerais essenciais feldspato alcalino e feldspatóide e o acessório piroxênio ocupam cerca de 90% da rocha. A granulometria grossa é uma característica favorável tanto para a liberação de minerais máficos na moagem, como para a remoção deles na separação magnética a seco.

4.2 Ensaios de Beneficiamento

4.2.1 Afunda-flutua com líquido denso

Os resultados da Tabela 2 mostram que a maior massa de minerais pesados está na fração -0,6 +0,25 mm, a qual concentra, também, a maior massa de Fe_2O_3 . Os dados ainda indicam que não é boa a seletividade entre máficos (pesados) e félsicos (leves) com o uso do bromofórmio. A causa provável é a baixa diferença entre os valores de densidade dos dois tipos de minerais. Entretanto, identifica-se que a seletividade e a liberação dos pesados aumentam com a diminuição da faixa granulométrica. Em geral, a liberação dos pesados não é eficaz, mesmo na fração mais fina (-0,25 +0,15 mm), o que certamente limitará a eficiência na separação magnética a seco.

4.2.2 Separação magnética a seco

Conforme os resultados da Tabela 3, com a diminuição da faixa granulométrica ocorre: i) diminuição da recuperação mássica do produto não-magnético; ii) aumento de perda mássica no repasse; iii) diminuição do teor de Fe_2O_3 no produto não-magnético; iv) diminuição da diferença de massa entre o passe e o repasse, exceto na faixa -0,25 +0,15 mm.

Na faixa -0,25 +0,15 mm há um aumento no teor de Fe_2O_3 no produto não-magnético em relação à faixa anterior, contrariando a tendência observada nos resultados dos ensaios de afunda-flutua, com a diminuição da faixa granulométrica. A provável causa é a baixa eficiência do peneiramento mecânico na separação de finos ($< 0,25$ mm), que aderem às partículas maiores e são arrastados para os produtos misto e magnético.

A Tabela 3 indica que o repasse é importante nas frações mais grossas (-2,0 +1,0 mm); nas demais, a diferença entre os teores de Fe_2O_3 é pequena.

Considerando que o teor máximo de Fe_2O_3 aceitável para uso na indústria de porcelanato é 0,65%, a faixa definida para operação industrial é -1,0 +0,15 mm, e com apenas um passe.

4.2.3 Flotação associada com separação magnética a úmido

Na Tabela 4, os dados mostram que na fração -0,25 mm há boa seletividade no estágio

rougher da flotação, mas pequena redução do teor de Fe_2O_3 . No estágio *scavenger* ocorre o inverso, isto é, baixa seletividade e acentuada redução no teor de Fe_2O_3 . Os dados da fração -0,15 mm da mesma tabela mostram que também há boa seletividade no estágio *rougher* da flotação neste material, mas ocorre uma redução acentuada no teor de Fe_2O_3 . No estágio *scavenger* a seletividade diminui e a redução no teor de Fe_2O_3 do concentrado não é tão acentuada. Como o objetivo é obter um produto com teor de Fe_2O_3 menor que 0,65%, a fração -0,25 mm é a que mais se aproxima deste valor.

A Tabela 5 indica que a separação magnética a úmido remove uma parcela considerável de Fe_2O_3 , estando a massa original flotada ou não. Comparativamente, os teores dos produtos não-magnéticos finais são mais favoráveis aos materiais previamente flotados. Porém, a seletividade do processo é baixa.

A flotação associada com separação magnética a úmido não é viável à produção da matéria-prima para o porcelanato, devido às baixas recuperações finais. Os teores de Fe_2O_3 nas duas frações ficam acima do limite (0,65%) nas operações sem flotação prévia. Além disso, a flotação associada resulta em teores inferiores àquele limite, porém, à custa de uma baixa recuperação mássica.

Para o segmento da indústria cerâmica, as matérias-primas fundentes para o porcelanato e esmalte submetem-se à exigência de cor, a qual depende do teor de Fe_2O_3 da matéria-prima. Para o porcelanato, são aceitáveis teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,65\%$; para o esmalte, os teores devem ser $\leq 0,35\%$. Como os processos desenvolvidos não possibilitaram teores de Fe_2O_3 compatíveis para uso em esmalte, a rocha aegirina-nefelina-microsienito poderá ser processada para gerar matéria-prima adequada ao porcelanato.

Os resultados mostraram que a separação magnética a seco é o processo apropriado à geração da matéria-prima, porque além de ser o de menor custo de investimento, de instalação e de operação, dispensa o uso de água e, por consequência, os custos de secagem da matéria-prima, permitindo a melhor recuperação mássica do minério beneficiado, se comparado aos demais processos.

5 CONCLUSÕES

A classificação petrográfica da rocha estudada é aegirina-nefelina-microsienito.

Os ensaios de afunda-flutua mostraram seletividade maior e crescente aumento do grau de liberação dos minerais portadores de ferro, com a diminuição das frações granulométricas.

A separação magnética a seco, em material de diferentes faixas granulométricas, gerou produtos não-magnéticos na faixa -1,0 +0,15 mm, cujos teores de Fe_2O_3 são considerados aceitáveis para a indústria do porcelanato.

Tentou-se a otimização com a separação magnética a úmido. Ainda que os teores fossem aceitáveis, a seletividade não foi boa, porque as recuperações foram muito baixas, inviabilizando a rota flotação associada com separação magnética a úmido.

REFERÊNCIAS

- 1 ARRUDA, F. **Relatório de pesquisa** (Interno). Criciúma : Mineração e Pesquisa Brasileira, 1966.
- 2 HILKER, R.G. Geological evaluation report. Calgary : Barriere Feldspar Proper, 1991. Disponível em: <<http://www.em.gov.bc.ca/DL/ARISReports/21897.pdf>>
- 3 LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA, S. L. **Tratamento de minérios**. 3. ed. Rio de Janeiro : CETEM/MCT, 2002.
- 4 MOREIRA, M.D. **Aplicações dos minerais e rochas industriais**. Salvador : Sociedade Brasileira de Geologia, 1984.
- 5 MOTTA, J.F.M. O Brasil e as matérias-primas para o grês porcelanato. **Revista Pólo Cerâmico**, v.1, p.3, jul. 2000.

Recebido em: 19/12/05

Aceito em: 10/03/06

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60., 2005, Belo Horizonte. São Paulo : ABM, 2005.