

COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE PASTAS MINERAIS PREPARADAS A PARTIR DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE FERRO

A. C. DE ARAUJO¹, G. E. S. VALADÃO¹, E. M. DA GAMA¹, C. A. O. HERNANDEZ²

¹ Departamento de Engenharia de Minas

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Rua Espírito Santo 35, Centro, Belo Horizonte – MG – Brasil

armando@demin.ufmg.br, gvaladao@demin.ufmg.br, emgama@demin.ufmg.br

² Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Arturo Prat – Unap

Avda. Arturo Prat 2120 Caixa postal 121 Iquique Região de Tarapacá – Chile

chernand@unap.cl

RESUMO

A disposição de materiais na forma de pastas minerais representa, normalmente, uma alternativa muito interessante aos métodos tradicionais, como a barragem de rejeitos, por exemplo. O estudo de propriedades reológicas e mecânicas das pastas minerais está se tornando de alta relevância para a mineração do Brasil, particularmente para os estágios de desaguamento, transporte e disposição final de lamas, de rejeitos de processos de concentração e de material estéril da mina. Dentre as características que podem ser estudadas, neste tipo de sistemas, destacam-se as seguintes: viscosidade, tensão de escoamento, ângulo de repouso para sua disposição, altura de abatimento de cone (altura de slump), resistência mecânica (compressão simples e cisalhamento triaxial). O objetivo deste trabalho é a determinação de características reológicas e mecânicas de pastas minerais, preparadas a partir de rejeitos de flotação, de lamas, e de algumas misturas destes dois produtos. As amostras utilizadas foram caracterizadas no que se refere à composição química, mineralógica e granulométrica. A área superficial específica na unidade de massa foi determinada pelo Método de Blaine. No estudo das características reológicas das pastas, foram realizados testes de abatimento de cone, testes de calha, e ensaios para a determinação da viscosidade das pastas em função da taxa de cisalhamento. As características mecânicas foram verificadas pelos testes de resistência à compressão das pastas minerais cimentadas de duas formas distintas com cimento Portland, e com uma mistura de meta caulim e cal. Os resultados indicaram: a) as pastas preparadas com rejeito de flotação apresentaram de caráter reotrópico; b) duplo caráter (tixotrópico e reotrópico) foi característico das pastas minerais preparadas com da lama; c) no caso das misturas de rejeito e lama, observou-se uma maior tendência ao tixotropismo; d) a adição da mistura ligante meta caulim e cal, em baixas quantidades (4 a 8% em massa), é responsável por resistências à compressão da ordem de 0,25 MPa mostrando-se adequada ao preenchimento superficial; e) a adição de cimento Portland, mostrou resistências da ordem de 2 MPa; f) foram obtidos ângulos de repouso superiores a 15°, em todas as pastas estudadas, valor que é bastante promissor no que se refere à uma possível disposição.

Palavras-chave: reologia, disposição de rejeitos, pastas minerais, preenchimento.

Área temática: separação sólido-liquido.

1. INTRODUÇÃO

O uso da tecnologia de pastas minerais ou "pasting" para backfill subterrâneo tem recebido cada vez mais atenção na indústria mineral. Esta é uma alternativa efetiva quanto a custo para preenchimento com polpa hidráulica e rocha em algumas aplicações. Na última década, esta tecnologia tem recebido crescente aceitação como um método de backfill de mina e mais recentemente, está propiciando benefícios também na disposição superficial de rejeitos da mineração, subprodutos da mineração de carvão e outros tipos de produtos industriais. (Johnson et al., 2005)

A pasta mineral pode ser definida como um sistema coloidal, que se apresenta como um fluido homogêneo, no qual não ocorre segregação granulométrica das partículas, e que ao ser disposto suavemente sobre superfícies estáveis, não mostra drenagem significativa de água (Jewell, 2002 e Araujo et al., 2004). Sua conformação e consistência, durante sua disposição, podem ser determinadas mediante técnicas tais como: teste de abatimento (*slump*) e teste de calha (*flume*). Na Figura 1 pode-se visualizar o aspecto de pastas minerais, utilizadas pela indústria mineira e em laboratório.

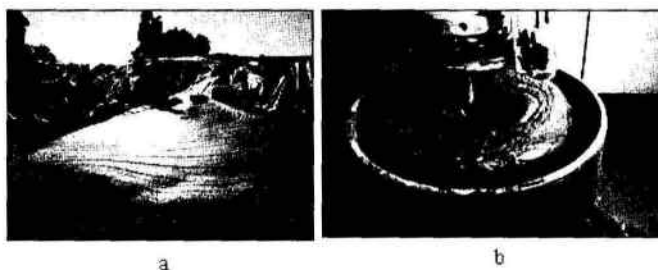


Figura 1 – Aspecto visual de pastas minerais: (a) indústria mineira; (b) em laboratório (Vietti e Dun, 2002 e Jewell, 2003)

A disposição de rejeitos mais adensados apresenta diversas vantagens em relação aos métodos convencionais ainda utilizados, como exemplo: maior recuperação/ recirculação de água, maiores ângulos de repouso possibilitando a disposição de maiores volumes de material para uma mesma área, menores custos de investimento e de operação, menor impacto ambiental. (Solfrá et al., 2002)

No Brasil e na América Latina, os rejeitos da mineração de ferro e da mineração de minérios metálicos são normalmente dispostos em forma de polpa em bacias ou barragens de rejeitos. Em contraste com esta situação, em países como Austrália, Canadá, Estados Unidos, África do Sul, há uma tendência para a disposição de rejeitos do processamento de minérios de forma mais adensada tanto em superfície quanto em cavas subterrâneas. (Araujo et al., 2004)

Dentre as características que podem ser estudadas nos sistemas de pastas minerais destacam-se as seguintes: viscosidade, tensão de escoamento, ângulo de repouso para sua disposição, altura de abatimento de cone, resistência mecânica (compressão simples e cisalhamento triaxial).

O objetivo deste trabalho é a determinação das características reológicas e mecânicas dos sistemas de pasta mineral, preparados a partir de rejeitos de flotação e de lamas, gerados no processamento de minérios de ferro.

2. DESENVOLVIMENTO

As amostras utilizadas no presente estudo, representam produtos processados em usina de concentração de minério de ferro de Minas Gerais. Especificamente, representam: lamas originadas da ciclonagem secundária (amostra I), rejeito do processo de flotação catiônica reversa (amostra II). Misturas destas 2 amostras, em proporções definidas, foram preparadas gerando as amostras III, IV e V.

As amostras minerais utilizadas (I e II) são compostas basicamente por hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2). As pastas minerais foram obtidas no laboratório por meio de adição controlada de água de processo em amostra seca até a obtenção de concentração de sólidos requerida. As duas amostras utilizadas apresentam diferentes composições químicas e distribuições granulométricas.

A caracterização do componente sólido das pastas minerais foi realizada considerando-se a determinação de: densidade (picnometria simples e a gás), granulometria (cyclosizer e difração de laser), área superficial específica (Blaine), composição química (análise química via úmida e espectrofotometria de absorção atômica) e mineralógica (difração de raios X e espectrometria de infravermelho).

O teste de abatimento foi realizado segundo metodologia simples que se acha descrita por Clayton et al., 2003 (Figura 2a). Neste teste é feita a determinação da altura de abatimento que é obtida mediante a diferença entre a altura inicial do material no molde do cone, ou cilindro, e a altura final quando este cone é retirado. Neste trabalho foi utilizado um cilindro de PVC com altura e diâmetro de 10 cm, e o cone de dimensões: altura: 30 cm; e diâmetros de base de 10 e 20 cm (descrever o cone também).

O teste de calha foi utilizado para a determinação do ângulo de repouso das pastas minerais estudadas. Uma calha foi especialmente construída em acrílico com as dimensões de 100 x 20 x 20 cm, para a realização dos testes. A figura 2b apresenta um tipo de calha sugerida por Sofrá et al., 2002.

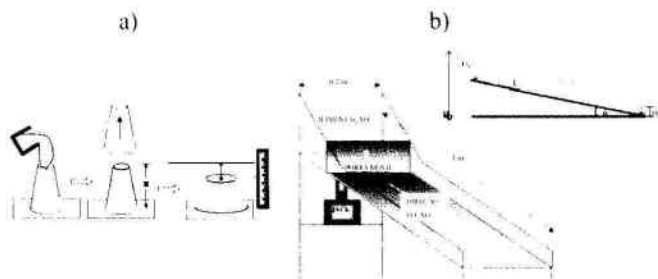


Figura 2 - a) teste de abatimento (Clayton et al., 2003); b) teste de calha (Sofrá et al., 2002)

O Viscosímetro Brookfield modelo DV-III foi utilizado no estudo do comportamento reológico das diferentes pastas minerais. Foram realizados testes com variação de velocidade de rotação da haste (crescente até alcançar um valor máximo e decrescente ao retornar ao ponto inicial). Verificou-se, desta forma, o comportamento tixotrópico ou reotrópico de cada pasta mineral preparada (Boger, 2003). Foram utilizadas as hastes LV-3 e LV-4, que permitem registrar os maiores valores da viscosidade neste aparelho para o ciclo reológico 1 180-1 rpm.

Para estudar o comportamento mecânico das pastas minerais foram realizados testes de resistência à compressão não confinada de corpos de prova das pastas cimentadas com cimento portland e com uma mistura de meta caulim e cal, segundo a norma ABNT - NBR 7215 (1998).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Densidade de amostras sólidas

Para o caso da amostra I (lamas), obteve-se um valor médio de $3,66 \text{ g/cm}^3$, enquanto que para a amostra II (rejeito de flotação), de $3,31 \text{ g/cm}^3$.

3.2. Distribuição granulométrica das amostras sólidas

As distribuições granulométricas das amostras sólidas determinadas através de difração de laser, são apresentadas na Figura 3.

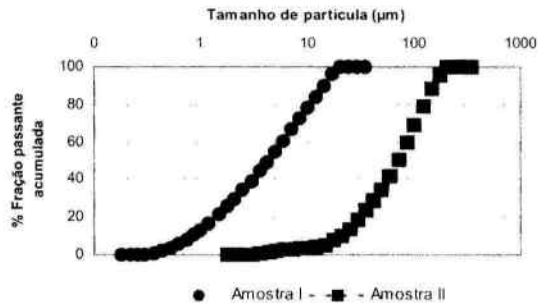


Figura 3 - Distribuição granulométrica das amostras I e II.

O valor d_{50} encontrado para a amostra I foi $4,34 \mu\text{m}$ e para a amostra II, $71,54 \mu\text{m}$. Isto evidencia que a amostra I tem uma distribuição granulométrica muito mais fina se comparada com a amostra II.

3.3. Composição química e mineralógica das amostras sólidas

A análise química da amostra I, realizada por análise via úmida e espectrofotometria de absorção atômica, indicou como elementos predominantes Fe (46,88%) e Si (9,63% SiO_2), quantidades menores de Al (7,22% Al_2O_3) e de Mn (2,70%). Na amostra II são mais dominantes os elementos Fe (30,81%) e Si (52,09% SiO_2).

A difração de raios X (DRX), mostrou para a amostra I, a presença de hematita (Fe_2O_3) como predominante, e em quantidades menores, goethita (FeO(OH)), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), pirolusita (MnO_2) e talco ($\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$). No caso da amostra II, foram identificados hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2) como espécies predominantes, gibsita (Al(OH)_3) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) em menor quantidade. A espectrometria de infravermelho ratificou a presença das espécies predominantes.

3.4. Área superficial específica das amostras sólidas

Os resultados de área superficial específica (ASE) na unidade de massa (Índice de Blaine) podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de ASE obtidos por permeabilímetro de Blaine segundo a Norma NBR NM 76 (1998).

Amostra	Origem e /ou característica	ASE (cm ² /g)
I	Lama da ciclonagem secundária	9.542
II	Rejeito de flotação	813
III	Mistura (75% Amostra I + 25% Amostra II)	3.754
IV	Mistura (50% Amostra I + 50% Amostra II)	3.150
V	Mistura (25% Amostra I + 75% Amostra II)	2.358

Da tabela anterior, verifica-se que nas amostras com distribuições de tamanho mais fina (I e III), os valores de ASE são mais elevados (superiores a 3.750 cm²/g), e na amostra mais grosseira (II) o valor da ASE só alcança 813 cm²/g.

3.5. Viscosidade das pastas minerais

A Figura 4 apresenta o comportamento reológico das pastas preparadas com as amostras I, II, III, IV e V, para o ciclo 1-180-1 rpm. Da Figura 4-a pode-se observar que os maiores valores da viscosidade são apresentados pela pasta com 65% de sólidos da amostra III, para baixas velocidades de rotação da haste (<80 rpm), e pela pasta de 65% de sólidos da amostra I para maiores velocidades (80-180 rpm). Ambas amostras apresentam comportamento reológico misto (reotrópico e tixotrópico), sendo a pasta da amostra III mais tixotrópica e a da amostra I, mais reotrópica. As demais pastas apresentam valores de viscosidade e tendências similares, sendo que a pasta da amostra II contém 78% de sólidos enquanto que as pastas das misturas (amostras IV e V) contêm somente 65% em sólidos. As pastas preparadas com as amostras II e V são reotrópicas nestas condições. A amostra IV tem um comportamento misto com maior predomínio da tixotropia, fato que poderia atribuir-se a maior quantidade de material fino contido nessa amostra. Na Figura 4-b observa-se que os maiores valores da viscosidade são mostrados pela pasta de 68% de sólidos da amostra I (2.000-16.000 cP). É interessante o resultado mostrado pela pasta de 82% de sólidos da amostra II, cujo comportamento, no ciclo de retorno, apresenta elevados valores da viscosidade nas baixas velocidades de rotação da haste (<100 rpm). As demais pastas com altos adensamentos de sólidos, preparadas com as misturas, apresentam curvas com tendências similares. O tixotropismo predomina na quase totalidade das amostras, com a exceção da pasta da amostra II (altamente reotrópica).

3.6. Teste de abatimento de cone

A Figura 5i apresenta um gráfico com os valores de abatimento da altura do cone (em %) em função da fração de sólidos em volume para as pastas preparadas com as amostras I, II e IV, considerando a utilização de cilindro e cone como molde. Verifica-se, nesta figura, que o cilindro apresenta sempre adensamentos menores de pasta para atingir uma mesma altura de abatimento (consistência da pasta).

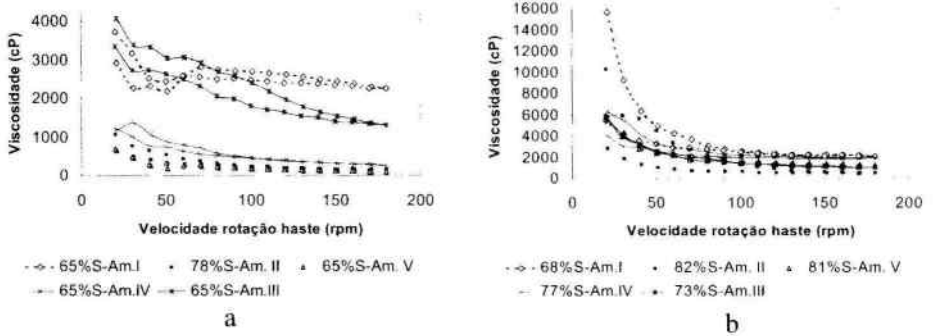


Figura 4 – Comportamento reológico no ciclo I-180-1 rpm para pastas: a) menos adensadas; b) mais adensadas

Observa-se ainda que há maior diferença nas curvas de abatimento para a amostra I (mais fina), seguida da amostra IV. A amostra II mostrou uma diferença mínima nos testes de geometria cônica e cilíndrica, o que poderia ser explicado pela diferença na distribuição granulométrica das amostras. As Figuras 5ii-a, 5ii-e, 5ii-f, mostram as fotografias dos testes de abatimento empregando o cone, enquanto que as Figuras 5ii-b, 5ii-d, 5ii-f, exibem os perfis dos testes de abatimento praticados com o cilindro nas pastas da amostra IV. São apresentados, também, os adensamentos utilizados e as porcentagens de abatimento para cone e cilindro.

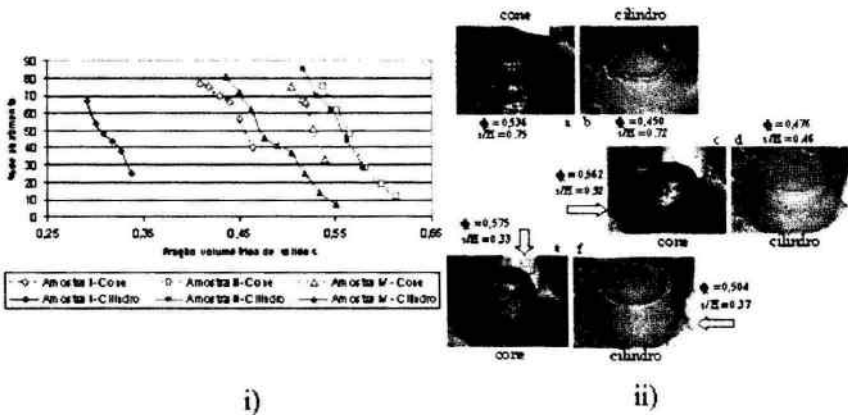


Figura 5 – i) Gráfico de porcentagem de abatimento da altura em função do adensamento da pasta; ii) fotografias dos testes de abatimento usando cone e cilindro.

3.7. Teste de calha

Os valores dos ângulos de repouso (θ_R) obtidos para diferentes adensamentos de pasta podem ser observados na Figura 6i. Nota-se que com o aumento da inclinação da base da calha há uma redução no ângulo de repouso da pasta. Neste caso foram consideradas as inclinações de 0 e 3% em relação à horizontal. Observa-se, ainda, que há um ordenamento das curvas correspondentes ao ângulo de repouso em função do adensamento. Todas as

curvas mostradas apresentam valores máximos de θ_R que superam o valor de 15° , valor muito mais elevado que o normalmente utilizado nas usinas mineiras. Na Figura 6ii-a pode-se apreciar o perfil da calha após a realização de um teste de calha, usando uma pasta com adensamento de $\phi=0,425$ ou $73\%S_m$ e com 0% de inclinação da base da calha. A Figura 6ii-b mostra, em detalhe, o perfil final de uma pasta mais adensada ($\phi=0,438$ ou $74\%S_m$) para uma inclinação de 1% na calha. Observou-se, neste caso, maior facilidade de separação da água. Na Figura 6ii-c pode se observar o aparecimento de estrias em uma pasta com menor adensamento que as anteriores ($\phi=0,401$ ou $71\%S_m$) e sem inclinação na base da calha. (definir ϕ e S_m no texto)

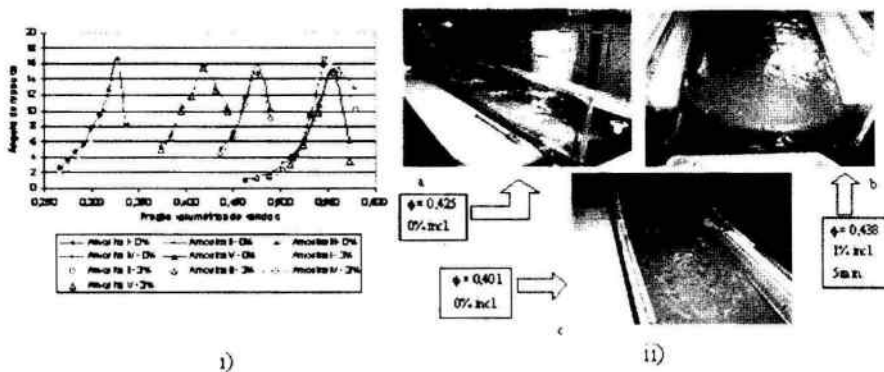


Figura 6 – i) Gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento da pasta; ii) fotografias de testes de calha da amostra I.

3.8. Teste de Resistência à compressão

Corpos de prova curados por 7 e 28 dias dentro de uma câmara úmida, foram rompidos utilizando uma prensa hidráulica MTS. Foram utilizados como ligantes cimento portland e uma mistura de 95% meta caulim e 5% de cal. A Figura 7 mostra os resultados da tensão de ruptura por compressão para diferentes pastefill testados. A maior resistência (>2 MPa) é mostrada pelo pastefill preparado com a amostra IV (50% da amostra I e 50% da amostra II) e cimentado com 4% de cimento portland (CP) para um tempo de cura de 7 dias. A menor resistência (0,25 MPa) é registrada pelo pastefill cimentado com 4% de meta caulim e cal (MK+CaO) e com um tempo de cura de 28 dias.

4. CONCLUSÃO

As principais conclusões do trabalho são: a) a utilização das pastas minerais para preenchimentos superficiais e subterâneos, representa uma interessante alternativa às práticas convencionais de disposição de rejeitos subaquáticos; b) a amostra I (produto de deslamagem) é mais fina e composta predominantemente por hematita, tendo um teor de Fe de cerca de 48%; c) a amostra II, mais grosseira, (rejeito de flotação), é constituída predominantemente por hematita e quartzo (em proporções similares); d) as pastas preparadas com a amostra I, mostraram um caráter reológico duplo, sendo mais tixotrópico nos menores adensamentos e mais reotrópico nos maiores adensamentos; e) as pastas preparadas com a amostra II, apresentam um caráter reotrópico

predominante; f) As amostras III, IV e V apresentaram comportamento reológico duplo reotrópico? para adensamento foi mais baixo (65%) e predominantemente tixotrópico para adensamento mais elevado (>73%); g) verificou-se, de maneira geral, que o aumento da fração de finos causou aumento na viscosidade da pasta; h) os testes de abatimento e calha mostraram ser ferramentas muito simples e efetivas na caracterização reológica dos sistemas de pastas minerais; i) nos testes de calha, observou-se pequeno efeito da inclinação considerando a faixa entre os valores de 0 e 3%; j) a maior tensão de ruptura foi alcançada pela pasta preparada com a mistura das amostras I e II (amostra IV) e cimentada com 4% cimento portland durante 7 dias de cura; a menor resistência foi obtida pela pasta cimentada com 4% de meta caulim e CaO com 28 dias de cura.

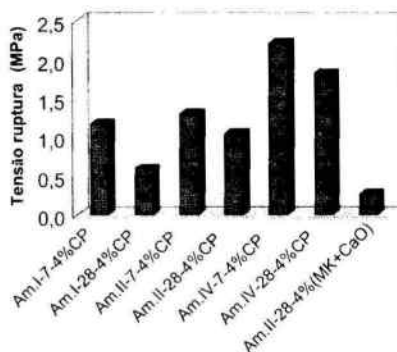


Figura 7: Tensões de ruptura por compressão para diferentes pastefill cimentados.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma para Cimento Portland – Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine) – NBR NM 76, Rio de Janeiro, 1998, p. 1-12.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma para Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. NBR 7215, Rio de Janeiro, 1998, p. 1-8.
- ARAUJO, A. C.; VALADÃO, G. E. S.; HERNANDEZ, C. A. O. - Nueva Aplicación de los Relaves de Hierro? In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MINING, METALURGY AND MATERIALS – CIM3, 3, 2004, Iquique - Chile, Anais do Congresso, p. 176-190.
- BOGER, D. V. - Workshop of Minerals Processing and Tailings Rheology. In: International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 5, 2003, Melbourne - Australia, Anais digitais. Australia, 2003. 1 CD.
- CLAYTON, S., GRICE, T. G., BOGER, D. V. - Analysis of the Abatimento Test for on-site Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, Melbourne - Australia, No. 70, p. 3-21, Jun 2003.
- HERNÁNDEZ, C. A. O.; ARAUJO, A. C.; VALADÃO, G. E. S.; AMARANTE, S. C. - Pasting Characteristics of Hematite/Quartz Systems. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SEPARATION SOLID/LIQUID - SSL, 20, 2004, Cape Town - África do Sul, Anais digitais.
- JEWELL, R. - Paste & Thickened Tailing (P&TT) in the Australian Mining Industry. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, 4, 2002, Santiago - Chile, Anais digitais.
- JUNG, S. J., BISWAS, K. - Review of Current High Density Paste Fill and its Technology. **Mineral Resources Engineering**, Idaho - USA, Vol. 11, No. 2, p. 165-182, Jun 2002.
- LAUDRIAULT, D. - The Surface Disposal of Industrial Waste: Slurry Placement v/s High Density Slurry Placement v/s Placement as a Paste. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, 4, 2002, Santiago - Chile, Anais digitais.
- SOFRÁ, F.; BOGER, D. V. - Environmental Rheology for Waste Minimisation in the Minerals Industry. **Chemical Engineering Journal**, Melbourne - Australia, No.86, p. 319-330, 2002.
- VIETTI, A., DUNN, F. The Thirsty Business of Diamond Mining. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.