

CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DE SISTEMAS DE PASTEFILL DA MINERAÇÃO DE FERRO ⁽¹⁾

A. C. de Araujo⁽²⁾
B. G. E. S. Valadão⁽²⁾
C. C. A. O. Hernandez⁽³⁾

Resumo

Uma pasta mineral pode ser definida como um sistema coloidal com características de 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. É importante notar que dentre as propriedades de interesse de uma pasta mineral, destacam-se as seguintes: características reológicas como a tensão de escoamento e a viscosidade; altura de abatimento, que é determinada através do teste de abatimento; ângulo de repouso, o qual pode ser determinado mediante a utilização do teste de calha; e propriedades mecânicas da pasta cimentada. O objetivo deste trabalho é a determinação das características reológicas dos sistemas de pasta mineral, preparados a partir de rejeitos de flotação, e de lamas, gerados no processamento de minérios de ferro. A metodologia envolveu a caracterização do sólido e das pastas minerais preparadas. Os resultados indicaram: a) a utilização das pastas minerais para preenchimentos superficiais e subterrâneos representa uma interessante alternativa às práticas convencionais de disposição subaquática de rejeitos; b) a amostra I é mais fina e composta predominantemente por hematita, tendo um teor de Fe de cerca de 48%; c) a amostra II, mais grosseira, é constituída predominantemente por hematita e quartzo; d) as pastas preparadas com a amostra I, mostraram um caráter reológico duplo, e) as pastas preparadas com a amostra II, apresentam um caráter reotrópico predominante; f) As amostras III, IV e V apresentaram comportamento reológico duplo; 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 na inclinação da calha, isto considerando os valores extremos de 0 e 3%.

Palavras-chave: Reologia; Disposição de rejeitos; Obtenção de pastas.

(1) LX Congresso da ABM, Julho do 2005, Belo Horizonte/MG, Brasil.

(2) Grupo de Tratamento de Minérios – Departamento de Engenharia de Minas
Universidade Federal de Minas Gerais – Rua Espírito Santo 35 – Sala 702 – Bairro Centro
CEP. 30160-030 – Belo Horizonte – MG – Brasil.

Email: gvaladao@demin.ufmg.br; armando@demin.ufmg.br

(3) Área de Metalurgia – Departamento de Engenharia – Universidad Arturo Prat
Avenida Arturo Prat 2120 – C.P. 121 – Iquique – Região de Tarapacá – Chile

Email: chernand@unap.cl

INTRODUÇÃO

O conceito de pasta mineral, também conhecida como sistema *pastefill*, é relativamente novo e vem ganhando espaço na Indústria Mineral, de forma específica, na temática da disposição dos rejeitos gerados pela mineração. 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 da Austrália (a e b) e em laboratório no Brasil (c).

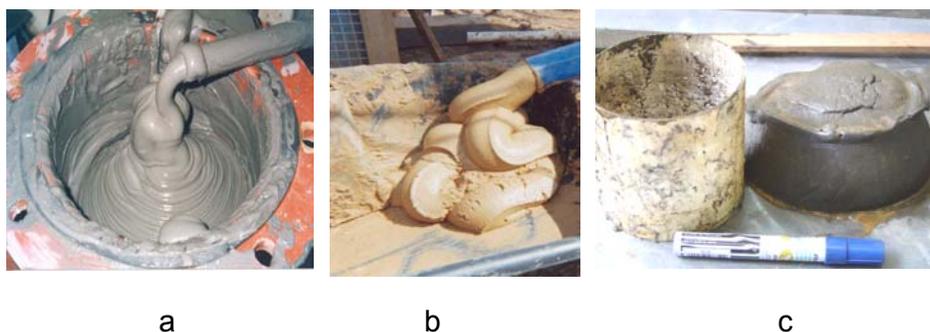


Figura 1. Aspecto visual de pastas minerais, indústria mineira da Austrália (a e b) e em laboratório no Brasil (c) (Jewell, 2002; Hernández et al., 2004)

Na atualidade os rejeitos da mineração de ferro no Brasil e da mineração de minérios metálicos nos países da América Latina, 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)

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. (Sofrá et al., 2002)

É importante notar que dentre as propriedades de interesse de uma pasta mineral, destacam-se as seguintes: características reológicas como a tensão de escoamento e a viscosidade; altura de abatimento, que é determinada através do teste de abatimento; ângulo de repouso, o qual pode ser determinado mediante a utilização do teste de calha; propriedades mecânicas da pasta cimentada.

O trabalho de Clayton et al. (2003) apresenta resultados experimentais de testes de abatimento preditos pelos modelos teóricos do teste para geometrias cilíndricas e cônicas. Estes resultados podem ser vistos na Figura 2a. Na Figura 2b podem ser observados os possíveis ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pastas minerais, de acordo ao tipo de terreno.

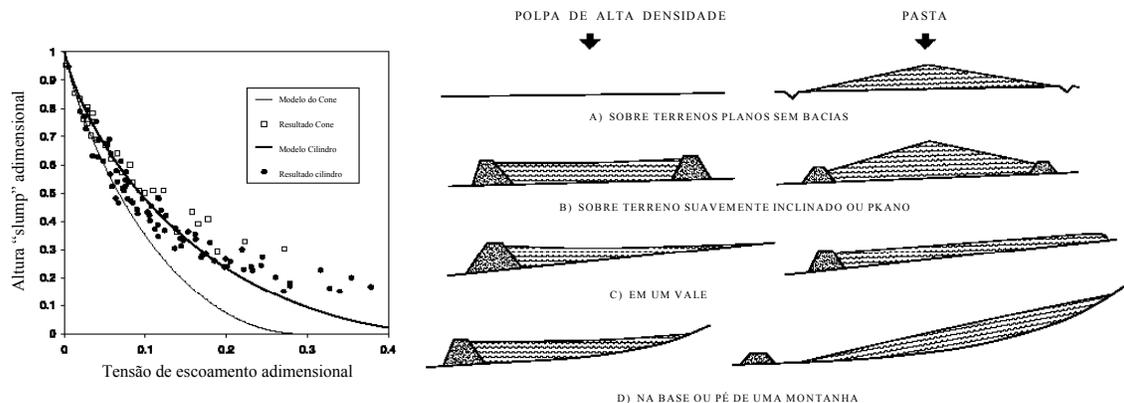


Figura 2. a) Altura abatimento em função da tensão de escoamento adimensionais (Clayton et al., 2003); b) possíveis ângulos de disposição (Laudriault, 2002)

O estudo das propriedades reológicas das pastas minerais é de vital importância para a mineração do Brasil considerando-se tanto no que se refere ao desaguamento quanto ao de transporte dos produtos processados.

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

MATERIAIS E MÉTODOS

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 realizadas originando 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 adequada. As duas amostras utilizadas apresentam diferentes 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, sedigraph), 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 3a). 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.

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 3b apresenta um tipo de calha sugerida por Sofrá et al., 2002.

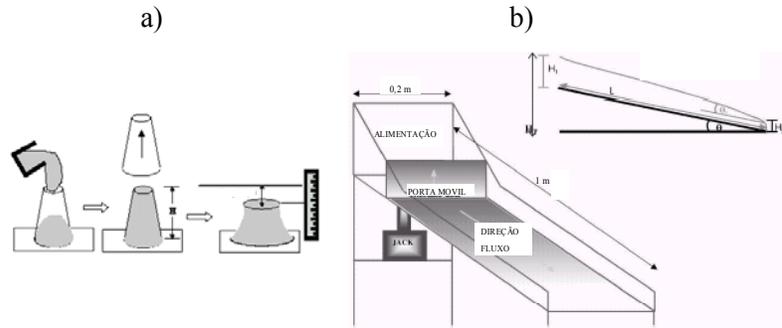


Figura 3. a) teste de abatimento (Clayton et al., 2003); b) calha (Sofrá et al., 2002)

Mediante a utilização do Viscosímetro Brookfield modelo DV-III, foi possível estudar o comportamento reológico das diferentes pastas minerais, realizando 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 maiores valores da viscosidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade de amostras sólidas

Para o caso da amostra I, obteve-se um valor médio de $3,310 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, enquanto que para a amostra II, de $3,655 \text{ (g/cm}^3\text{)}$.

Distribuição granulométrica das amostras sólidas

As distribuições granulométricas das amostras estão apresentadas na Figura 4. O valor d_{50} encontrado para a amostra I foi $4,34 \text{ }\mu\text{m}$ e para a amostra II, $71,54 \text{ }\mu\text{m}$. Isto evidencia que a amostra I é mais fina.

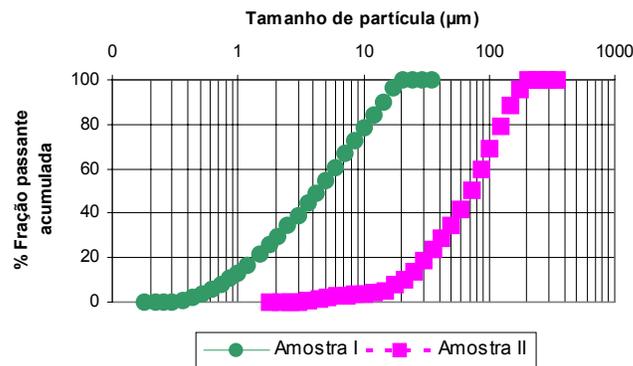


Figura 4. Distribuição granulométrica das amostras I e II.

Composição química das amostras sólidas

A análise química da amostra I indica como elementos predominantes Fe e Si, quantidades menores de Al e Mn. Na amostra II são ainda mais dominantes os elementos Fe e Si. A Tabela 1 apresenta os resultados da análise química de ambas as amostras.

Tabela 1. Análise química das amostras I e II

Elemento/espécie (% massa)	Teor em (%)	
	Amostra I	Amostra II
Fe total	46,88	30,81
SiO ₂	9,63	52,09
Al ₂ O ₃	7,22	0,30
Mn	2,700	0,082
MgO	0,212	0,027
P	0,087	0,017
CaO	0,018	0,007
PPC	6,630	0,460

Composição mineralógica das amostras sólidas

A difração de raios X (DRX), indicou para a amostra I, a presença de hematita (Fe₂O₃) que é predominante, goethita (FeO(OH)), caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄), pirolusita (MnO₂) e talco (Mg₃(OH)₂Si₄O₁₀). Esta determinação foi confirmada pelo resultado obtido pro meio de espectrometria de infravermelho (EIV). No caso da amostra II, foram identificados hematita (Fe₂O₃) e quartzo (SiO₂) como espécies predominantes, gibsita (Al(OH)₃) e caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) em menor quantidade. A espectrometria de infravermelho foi ratificou a presença das espécies predominantes.

Área superficial específica das amostras sólidas

A área superficial específica (ASE) na unidade de massa (Índice de Blaine) foi determinada para todas as amostras estudadas considerando-se a Norma NBR NM 76. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de ASE obtidos por permeabilímetro de Blaine segundo a Norma NBR NM 76.

Amostra	Origem e /ou característica	ASE (cm ² /g)
I	Lama da ciclonagem secundária	9.541,61
II	Rejeito de flotação	813,11
III	Mistura (75% Amostra I + 25% Amostra II)	3.753,60
IV	Mistura (50% Amostra I + 50% Amostra II)	3.149,79
V	Mistura (25% Amostra I + 75% Amostra II)	2.358,00

Da Tabela 2, verifica-se que nas amostras com distribuições de tamanho mais fina (I e III), os valores da ASE são mais elevados (superiores a 3.750 cm²/g), fato que comprova uma presença mais significativa de material fino.

Viscosidade das pastas minerais

Na Figura 5 são mostrados os comportamentos reológicos de algumas das pastas estudadas e preparadas com as amostras I e II. O ciclo reológico considerado foi: trajeto de ida: 1 - 180 rpm, e de volta: 180 - 1 rpm.

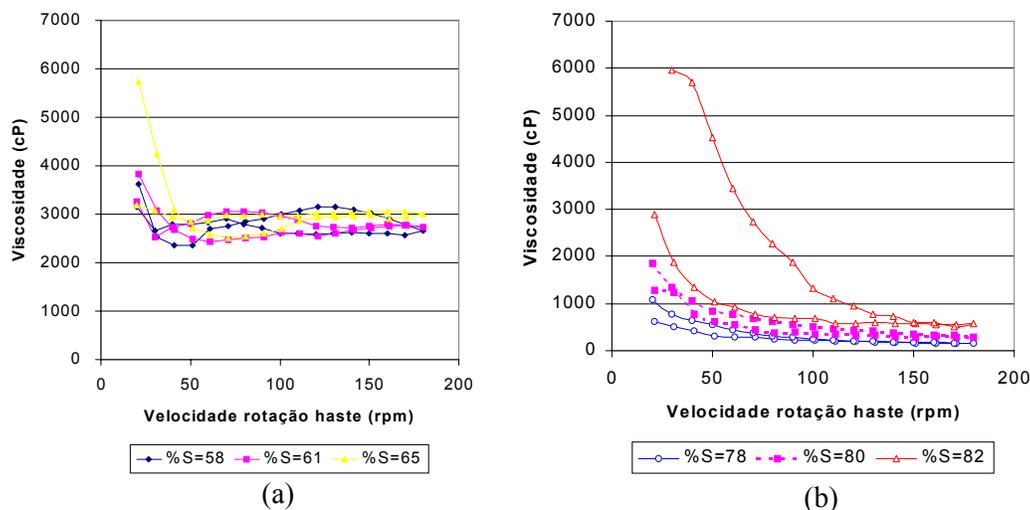


Figura 5. Viscosidade em função da velocidade de rotação da haste (1-180-1 rpm): a) pastas da amostra I; b) pastas da amostra II

Da Figura 5, pode-se observar que os valores da viscosidade alcançados pelas pastas da amostra I são maiores que aqueles obtidos para pastas da amostra II, com a exceção do trajeto de volta da pasta de 82% em sólidos da amostra II. Na Figura 5a observa-se o comportamento reológico das pastas adensadas com 58, 61, e 65% de sólidos (em massa) da amostra I. Verifica-se que o comportamento reológico não é único. Nas pastas com menores adensamentos (58 e 61% de sólidos) se observa uma diminuição do valor da viscosidade no trajeto de retorno do ciclo, ou seja, o comportamento é tixotrópico. Na pasta mais adensada (65% de sólidos), há um maior predomínio do comportamento reotrópico. A Figura 5b mostra o comportamento reológico de algumas das pastas preparadas com a amostra II, especificamente para os adensamentos de 78, 80 e 82% de sólidos (em massa). Neste caso, o comportamento, em geral predominante, é reotrópico.

A Figura 6 apresenta o comportamento reológico, em um ciclo 1-180-1 rpm, para pastas preparadas para as amostras I, II, III, IV e V. Na Figura 7a 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 IV 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.

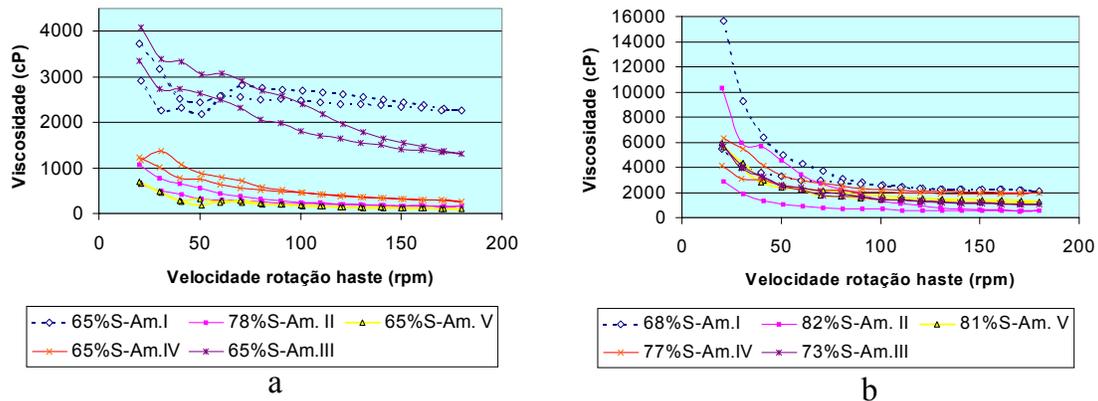


Figura 6. Comportamento reológico no ciclo 1-180-1 rpm para pastas: a) menos adensadas; b) mais adensadas.

Na Figura 6b 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 volta, apresenta elevados valores na 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).

Teste de Abatimento

A Figura 7a apresenta um gráfico com os valores de abatimento da altura (em porcentagem) em função da porcentagem de sólidos (em massa) 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 prediz sempre adensamentos menores de pasta para atingir uma mesma altura de abatimento. 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 8b-a, 8b-c e 8b-e, mostram as fotografias dos testes de abatimento (cone e cilindro), enquanto que as Figuras 7b-b, 7b-d e 7b-f, exibem os perfis dos testes de cilindro abatimento, realizados com as pastas da amostra IV. São apresentados, também, os adensamentos utilizados e as porcentagens de abatimento do cone ou cilindro. Observa-se que as diferenças entre ambas geometrias diminuem quando os adensamentos de pastas são maiores.

Teste de Calha

Os valores dos ângulos de repouso (θ_R) obtidos para diferentes adensamentos de pasta podem ser observados na Figura 8a. 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.

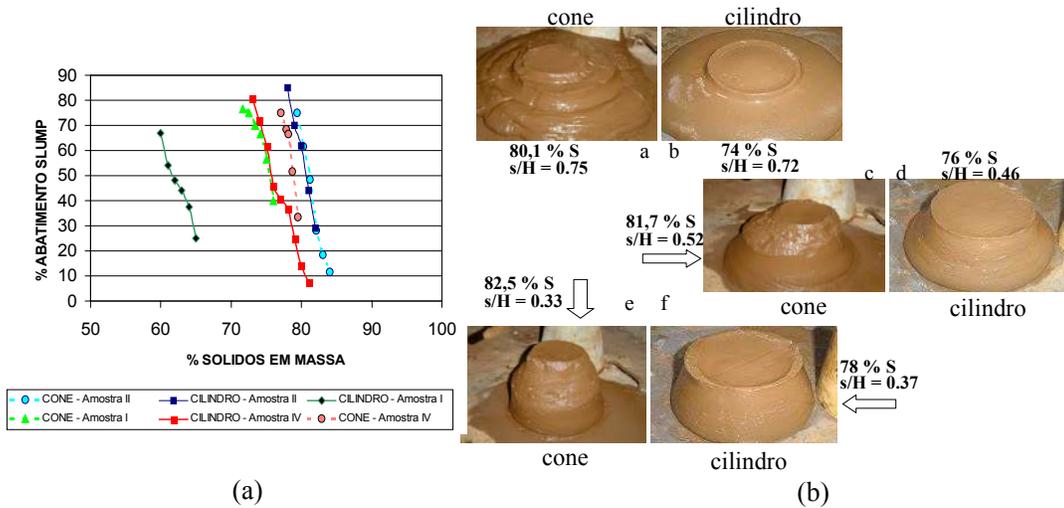


Figura 7. a) Gráfico de porcentagem de abatimento da altura em função do adensamento da pasta; b) fotografias dos testes de abatimento com cone e cilindro

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 na mineração.

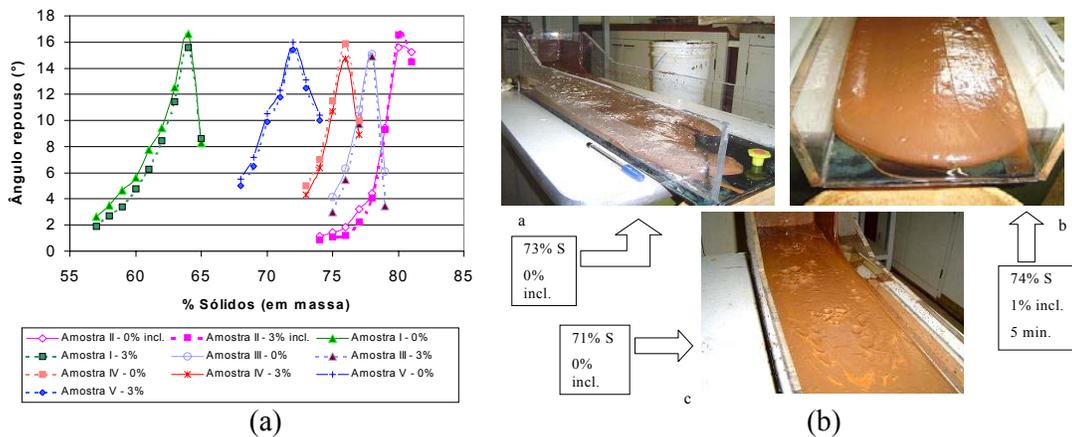


Figura 8. a) Gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento da pasta; b) fotografias de testes de calha da amostra I

Na Figura 8b-a pode-se apreciar o perfil da calha após a realização de um teste de calha, usando uma pasta com adensamento de 73% de sólidos e com 0% de inclinação da base da calha. A Figura 8b-b mostra, em detalhe, o perfil final de uma pasta mais adensada (74% em sólidos) para uma inclinação de 1% na calha. Observou-se, neste caso, maior facilidade de separação da água. Na Figura 8b-c pode se observar o aparecimento de estrias em uma pasta com menor adensamento que as anteriores (71% sólidos) e sem inclinação na base da calha.

CONCLUSÃO

As principais conclusões do trabalho são: a) a utilização das pastas minerais para preenchimentos superficiais e subterrâneos, 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 retróptico nos maiores adensamentos; e) as pastas preparadas com a amostra II, apresentam um caráter retróptico predominante; f) As amostras III, IV e V apresentaram comportamento reológico duplo quando o adensamento foi mais baixo (65%) e de predominantemente tixotrópico ao aumentar o adensamento (>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 na inclinação da calha, isto considerando os valores extremos de 0 e 3%. Houve, no entanto, maior facilidade na separação da água do componente sólido quando a calha se apresentava inclinada, o que deverá ser considerado na avaliação do projeto de sistema de disposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 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, 2004, p. 176-190.
- 2 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. 2004. 1 CD.
- 3 JEWELL, R. Paste & Thickened Tailing (P&TT) in the Australian Mining Industry. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, 4, 2002, Santiago - Chile, Anais digitais. Santiago, 2002. 1 CD.
- 4 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. Santiago, 2002. 1 CD.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.

REOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PASTEFILL SYSTEMS OF THE IRON MINING

*D. C. de Araujo
E. G. E. S. Valadão
F. C. A. O. Hernandez*

Abstract

A mineral paste can be defined as a colloidal system presenting characteristics of homogeneous fluid in which no particle size segregation takes place and, when gently disposed on a stable surface, water does not exudate from the paste. It is important to observe the following relevant characteristics: rheological parameters such as yield stress and viscosity, slump height as determined by the slump test, repose angle as determined by the flume test and mechanical properties of the cemented paste. The objective of this work is to determine the rheological characteristics of paste mineral systems prepared from iron ore flotation tailings and slimes and mixtures of these two materials. The methodology involved the characterization of the solids and of the pastes. The results indicate: a) utilization of mineral pastes for filling surface and underground cavities represents an interesting alternative to the conventional underwater tailings disposal practice; b) sample I is finer and it is composed mainly by hematite with an iron grade of 48%; c) sample II is coarser and it is composed dominantly by quartz and hematite; d) pastes prepared with sample I displayed a double rheological character; e) pastes prepared with sample II showed a dominant rheotropic characteristic; f) samples III, IV and V (mixtures of samples I and II) showed a double rheological character; g) in general an increase in fines fraction on the samples was directly associated with an increase in paste viscosity; h) slump and flume tests were both found as simple and very effective tools for the rheological characterization of the mineral pastes; i) on the flume tests only a slight effect was observed for the flume slope angle in the range from 0 to 3%.

Key-words: Rheology; Pastefill; Iron; Mining.