

# ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE ALGUMAS PASTAS MINERAIS

Christian Anthony Hernández Osorio <sup>1</sup>

Armando Corrêa de Araujo <sup>2</sup>

George Eduardo Sales Valadão <sup>3</sup>

## Resumo

Uma pasta mineral pode ser definida como um sistema coloidal com características de um fluido homogêneo, no qual não ocorre segregação granulométrica, e que ao ser disposto não apresenta drenagem significativa de água. 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 disposição utilizando pastas minerais representa uma alternativa às práticas convencionais; b) a amostra I é mais fina e composta predominantemente por hematita; 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, apresentaram um caráter reotrópico predominante; f) as amostras III, IV e V apresentaram comportamento reológico duplo; g) de maneira geral, o aumento da fração de finos causou aumento na viscosidade da pasta; e h) nos testes de calha, observou-se pequeno efeito na inclinação da calha.

**Palavras-chave:** Reologia; Rejeitos; Pasta mineral.

## STUDY OF CHARACTERISTICS OF SOME MINERAL PASTES

### 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 water does not exudate from the 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 represents an alternative to the conventional practice; b) sample I is finer and it is composed mainly by hematite (48% Fe); 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; and h) on the flume tests only a slight effect was observed for the flume slope angle.

**Key words:** Rheology; Tailing; Mineral paste.

## I INTRODUÇÃO

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.<sup>(1-2)</sup>

Sua conformação e consistência, durante sua disposição, podem ser avaliadas por meio de 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 mineral da Austrália (a e b) e em laboratório no Brasil (c).

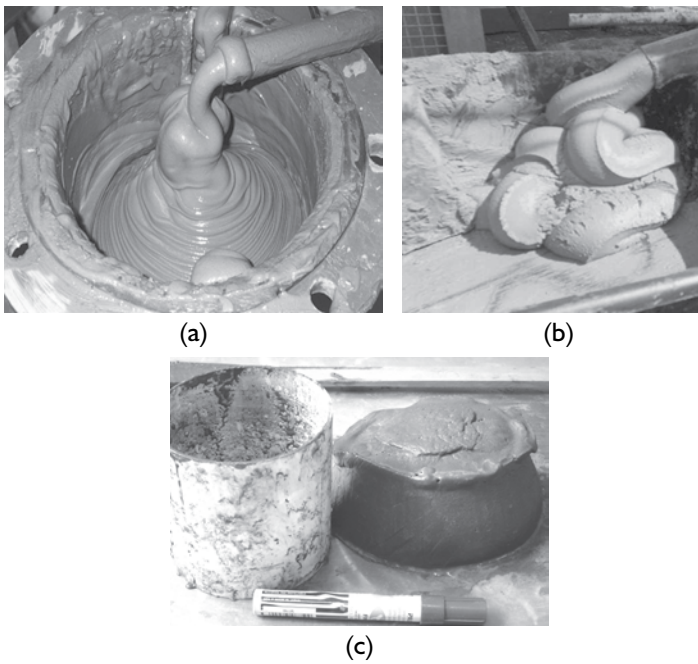
No Brasil, atualmente, os rejeitos do beneficiamento são normalmente dispostos em forma de polpa em barragens (bacias). Em países como Austrália, Canadá, Estados Unidos, África do Sul, há uma tendência para a disposição de rejeitos mais adensados.<sup>(2)</sup> Esta disposição apresenta vantagens como: maior recuperação/recirculação de água, maiores ângulos de repouso, menores custos de investimento e de operação, menor impacto ambiental.<sup>(4)</sup>

Algumas propriedades de interesse de uma pasta mineral, podem ser destacadas: caracterís-

<sup>1</sup>Engenheiro Metalurgista, Dr., Departamento de Engenharia, Universidad Arturo Prat – UNAP, Avenida Arturo Prat N° 2120, Iquique, Chile – christian.hernandez@unap.cl.

<sup>2</sup>Engenheiro de Minas, Ph.D., Departamento de Engenharia de Minas – UFMG, Rua Espírito Santo, 35 sala 702, Belo Horizonte, MG, Brasil 30160-030 – armando@demin.ufmg.br

<sup>3</sup>Engenheiro de Minas, Dr. Departamento de Engenharia de Minas – UFMG, Rua Espírito Santo, 35 sala 702, Belo Horizonte, MG, Brasil 30160-030 – gvaladao@demin.ufmg.br



**Figura 1.** Aspecto visual de pastas minerais, indústria mineral da Austrália (a e b) e em laboratório no Brasil (c).<sup>(1,3)</sup>

ticas reológicas (tensão de escoamento e viscosidade); altura de abatimento (*slump*); ângulo de repouso; propriedades mecânicas da pasta com adição de ligante (cimento ou outro material).

O trabalho de Clayton, Grice e Boger<sup>(5)</sup> apresenta resultados experimentais de testes de abatimento previstos pelos modelos teóricos do teste para geometrias cilíndricas e cônicas. Estes resultados podem ser vistos na Figura 2a. Na Figura 2b são comparadas as possíveis disposições de polpas de alta densidade e pastas minerais, de acordo com o tipo de terreno.

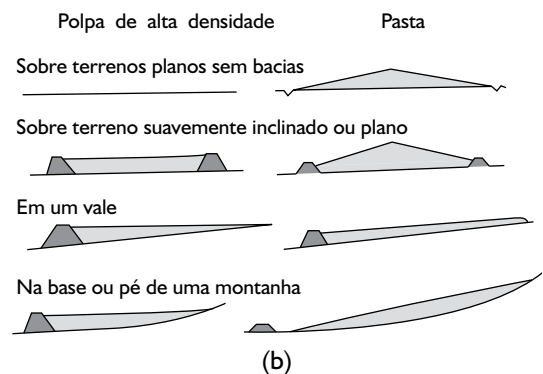
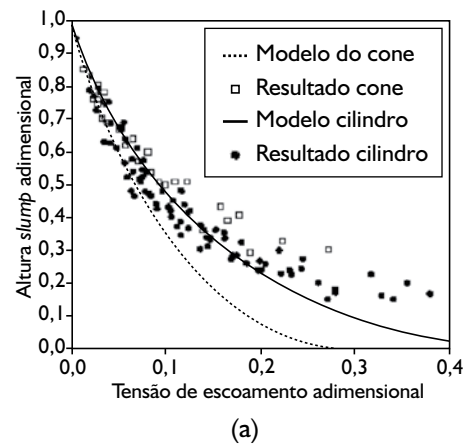
O estudo das propriedades reológicas das pastas minerais tem importância para a mineração do Brasil considerando-se tanto desaguamento quanto ao de transporte dos produtos processados.

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.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras utilizadas representam produtos do processamento de minério de ferro de Minas Gerais: lamas (amostra I), rejeito do processo de flotação (amostra II), misturas destas duas amostras (amostras III, IV e V). As pastas minerais foram obtidas no laboratório por meio de adição controlada de água de amostra seca.

Foram determinadas: 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).



**Figura 2.** a) Altura abatimento em função da tensão de escoamento adimensionais;<sup>(5)</sup> e b) possíveis ângulos de disposição.<sup>(6)</sup>

O teste de abatimento foi realizado segundo metodologia descrita por Clayton, Grice e Boger.<sup>(5)</sup> Neste trabalho foi utilizado um cilindro de PVC (altura e diâmetro de 10 cm), e um cone (altura de 30 cm; e diâmetros de base de 10 cm e 20 cm).

O teste de calha foi utilizado para a determinação do ângulo de repouso das pastas minerais. Uma calha foi especialmente construída em acrílico com as dimensões de 100 x 20 x 20 cm. A Figura 3b apresenta a calha sugerida por Sofrá e Boger.<sup>(4)</sup>

O comportamento reológico foi avaliado por meio Viscosímetro Brookfield modelo DV-III. Os testes envolveram variação de velocidade de rotação da haste

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Material Sólido

A massa específica média determinada para a amostra I foi 3,31 g/cm<sup>3</sup> e 3,66 g/cm<sup>3</sup> para a amostra II.

As distribuições granulométricas das amostras estão apresentadas na Figura 4. 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 é mais fina.

A análise química (Tabela 1) indica que a amostra I tem como elementos predominantes Fe e Si, e quantidades menores de Al e Mn. Na amostra II são ainda mais dominantes os elementos Fe e Si.

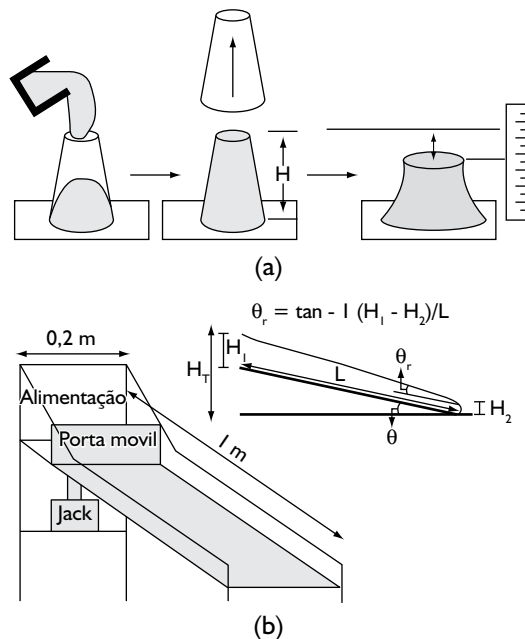


Figura 3. a) teste de abatimento;<sup>(5)</sup> e b) calha.<sup>(4)</sup>

Tabela 1. Análise química das amostras I e II.

Elemento/espécie (% massa)	Teor (%)	
	Amostra I	Amostra II
Fe total	46,88	30,81
SiO <sub>2</sub>	9,63	52,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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

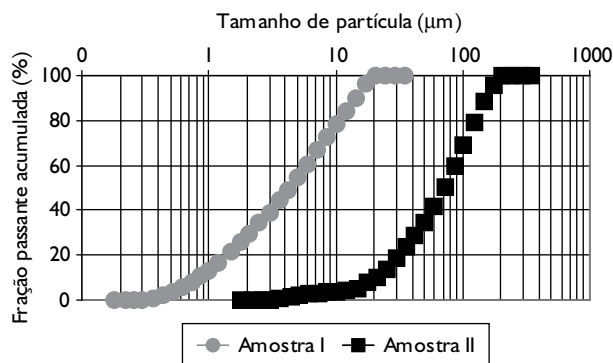


Figura 4. Distribuição granulométrica das amostras I e II.

A difração de raios X (DRX), indicou para a amostra I, a presença predominante de hematita, goethita, caulinita, pirrolusita e talco. Na amostra II, foram identificados hematita e quartzo (predominantes), gibsita e caulinita (menor quantidade).

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.

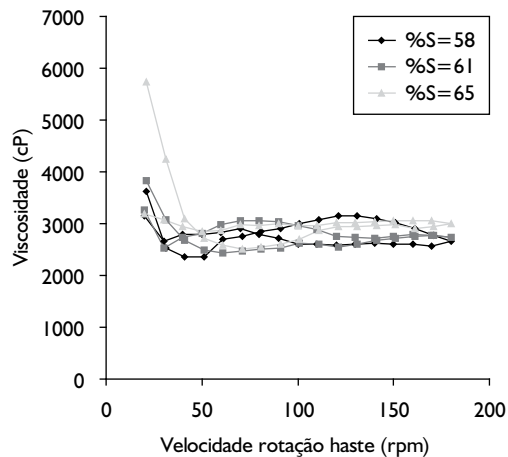
Amostra	Origem e /ou característica	ASE (cm <sup>2</sup> /g)
I	Lama da ciclonagem secundária	9.541,61
II	Rejeito de flotação	813,11
III	Mistura (75% Amostra I + 25% Amostra II)	3.753,60
IV	Mistura (50% Amostra I + 50% Amostra II)	3.149,79
V	Mistura (25% Amostra I + 75% Amostra II)	2.358,00

Verifica-se, pela Tabela 2, que nas amostras com distribuições de tamanho mais fina (I e III), os valores da ASE são mais elevados (superiores a  $3.750 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), fato que comprova uma presença mais significativa de material fino.

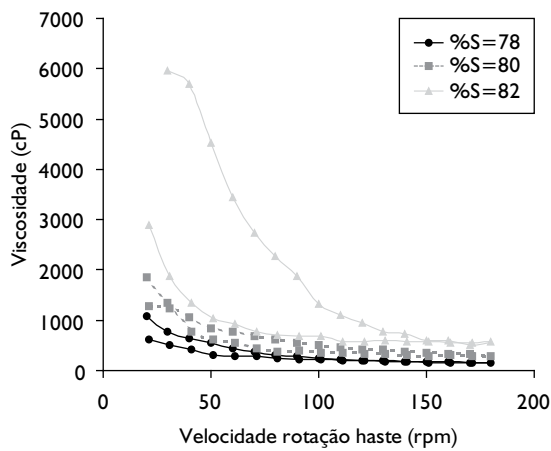
### 3.2 Viscosidade das Pastas Mineraias

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: I - 180 rpm, e de volta: 180 - I rpm.

Observa-se na Figura 5 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 que o comportamento reológico das pastas da amostra I, com 58%, 61%, e 65% de sólidos (em massa), não é único. Nas pastas com menores adensamentos (58% e 61% de sólidos) nota-se 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 78%, 80% e 82% de sólidos (em massa). Neste caso, o comportamento predominante, é reotrópico.



(a)

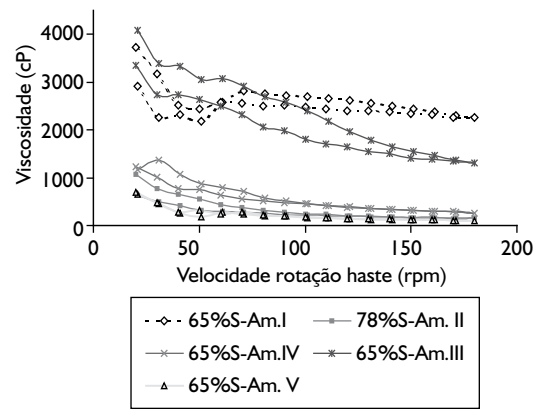


(b)

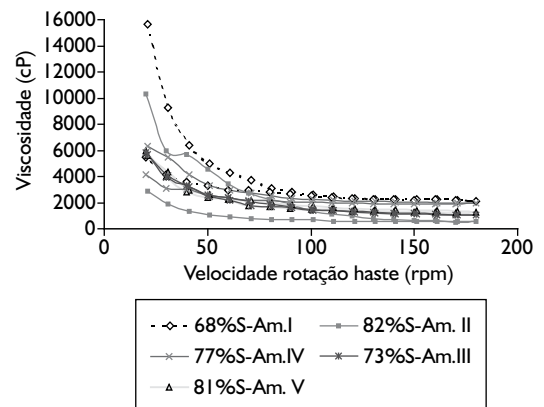
**Figura 5.** Viscosidade em função da velocidade de rotação da haste (I-180-I rpm): a) pastas da amostra I; e b) pastas da amostra II.

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

Na Figura 6a 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). 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. Na Figura 6b observa-se que os maiores valores da viscosidade são mostrados pela pasta de 68% de sólidos da amostra I (2.000 cP-16.000 cP). A da amostra II (82% de sólidos) apresenta, no ciclo de volta, elevados valores na viscosidade em baixas velocidades de rotação da haste (<100 rpm). As demais pastas com altos adensamentos, preparadas com as misturas, apresentam curvas com tendências



(a)



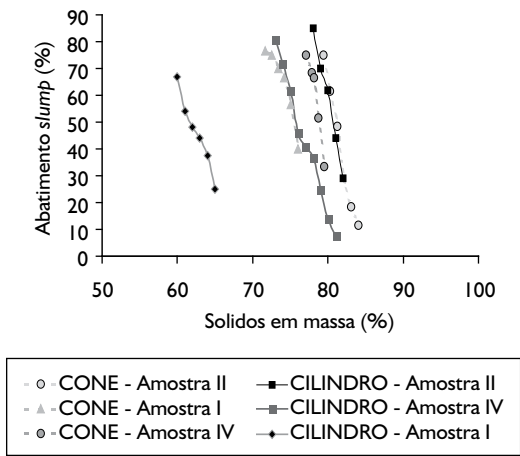
(b)

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

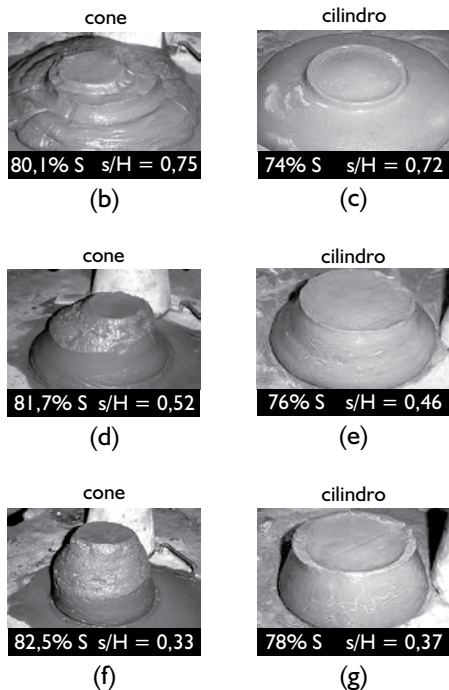
similares. O tixotropismo predomina na quase totalidade das amostras, com a exceção da pasta da amostra II.

### 3.3 Teste de Abatimento

Na Figura 7a observam-se 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 mostra 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). A amostra II mostrou uma diferença mínima nos testes de geometria cônica e cilíndrica. As Figuras 7b,d,f mostram as fotografias dos testes de abatimento (cone e cilindro), enquanto que as Figuras 7c,e,g exibem os perfis dos testes de cilindro abatimento, realizados com as pastas da amostra IV. São apresentados, também, os aden-



(a)

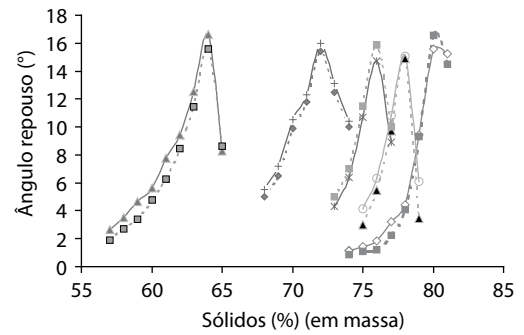


**Figura 7.** a) porcentagem de abatimento da altura em função do adensamento da pasta; b-g) fotografias dos testes de abatimento com cone e cilindro.

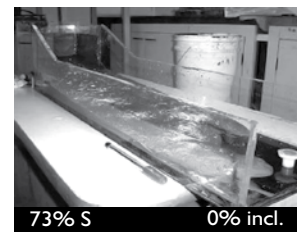
samentos utilizados e as porcentagens de abatimento do cone ou cilindro. Observa-se que as diferenças entre ambas as geometrias diminuem quando os adensamentos de pastas são maiores.

### 3.4 Teste de Calha

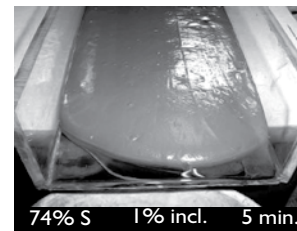
Os valores dos ângulos de repouso ( $\theta_R$ ) obtidos para diferentes adensamentos de pasta podem ser observados na Figura 8a. Nota-se que com o aumento da inclinação da base da calha há uma redução no ângulo de repouso da pasta. Neste caso foram consideradas as inclinações de 0% e 3% em relação à horizontal. 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  $\theta_R$  que superam o valor de  $15^\circ$ , valor bastante.



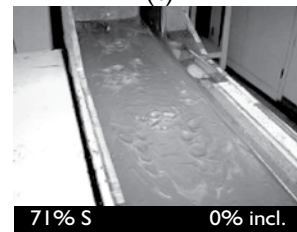
(a)



(b)



(c)



(d)

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

Na Figura 8b verifica-se o perfil da calha após a realização de um teste, usando uma pasta com 73% de sólidos e com 0% de inclinação. A Figura 8c mostra, em detalhe, o perfil final de uma pasta com 74% em sólidos para uma inclinação de 1% na calha. Observou-se, neste caso, maior facilidade de separação da água. Na Figura 8d 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.

## 4 CONCLUSÃO

Os resultados indicaram: a) a disposição utilizando pastas minerais representa uma alternativa às práticas convencionais; b) a amostra I é mais fina e composta predominantemente por hematita; 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, apresentaram um caráter reotrópico predominante; f) as amostras III, IV e V apresentaram comportamento reológico duplo; g) de maneira geral, o aumento da fração de finos causou aumento na viscosidade da pasta; h) nos testes de calha, observou-se pequeno efeito na inclinação da calha.

## REFERÊNCIAS

- 1 JEWELL, R.J. Paste & thickened tailing (P&TT) in the Australian mining industry. In: High Density & Paste 2002 Seminar, 4., 2002, Santiago, Chile. **Anales...** Santiago: Universidad de Santiago, 2002.
- 2 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 – CIM, 3., Iquique, Universidad Arturo Prat. p. 176-90, 2004.
- 3 HERNÁNDEZ, C.A.O.; ARAUJO, A.C.; VALADÃO, G.E.S.; AMARANTE, S.C. Pasting characteristics of hematite/quartz systems. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOLID/LIQUID SEPARATION, 20., 2004, Cidade do Cabo, África do Sul. **Annals...** Cidade do Cabo: Minerals Engineering Conferences, 2004.
- 4 SOFRÁ, F.; BOGER, D.V. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, n. 6, p. 319-330, Jun. 2002.
- 5 CLAYTON, S., GRICE, T.G., BOGER, D.V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, v. 70, n. 1, p. 3-21, Jun. 2003.
- 6 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. **Anales...** Santiago: Universidad de Santiago, 2002.

Recebido em: 5/10/07

Aceitor em: 6/03/08

Proveniente de: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 7., 2006, Ouro Preto, MG. São Paulo: ABM, 2006.