

Capítulo 18

METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE REJEITOS: APLICAÇÃO EM UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO.

[DOI: 10.37423/200400735](https://doi.org/10.37423/200400735)

Vinícius Queiroga Fortes Ribeiro (Universidade Federal de Minas Gerais -Golder Associates, Belo Horizonte, Brasil). viniciusq.eng@gmail.com

Lucio Flávio de Souza Villar (Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil). lucio.villar@etg.ufmg.br

Gustavo Ferreira Simões (Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil). gustavo@etg.ufmg.br

Kátia Cristina de Oliveira Roberto Barcelos (Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil). katiaengcivil@yahoo.com.br

RESUMO: A reologia é uma importante propriedade para projetos geotécnicos de disposição de rejeitos. Em função da dificuldade de obtenção das propriedades reológicas em laboratório, historicamente, projetos de disposição de rejeitos negligenciam sua determinação. Com a evolução das tecnologias de espessamento e filtragem de rejeitos, e consequente aumento do uso das tecnologias de pasta, a determinação dos parâmetros reológicos se torna fundamental para o desenvolvimento dos projetos com sucesso. Adicionalmente, o conhecimento das propriedades reológicas dos rejeitos é de grande interesse para o desenvolvimento de estudos de rupturas de barragens de rejeitos, de maneira a viabilizar a inclusão das forças viscosas na rotina de cálculo do fluxo.

Este trabalho apresenta uma metodologia de determinação das propriedades reológicas Não-Newtonianas dos rejeitos, através da construção de um reômetro rotacional de palheta. Para a caracterização do material em estudo foram realizados ensaios geotécnicos de caracterização, e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os ensaios reológicos foram desenvolvidos para os rejeitos em vários teores de sólidos, de maneira a determinar a influência da consistência na viscosidade e tensão de escoamento. Para validação da metodologia proposta foram realizados outros ensaios reológicos simples como “Slump test” e “Vane Test”, de maneira a permitir sua comparação. Os resultados mostraram que a metodologia desenvolvida permite avaliar a curva de reologia dos rejeitos, dentro de um determinado intervalo de teores de umidade.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos em Pasta, Reologia, Fluidos Não-Newtonianos, Rejeitos de Minério de Ferro, Reômetro.

1. INTRODUÇÃO

A reologia é a ciência que estuda a resistência dos materiais ao fluxo. Os rejeitos de mineração são, normalmente, transportados e dispostos como uma mistura de água e sólidos, constituindo uma massa viscosa, cujas propriedades influenciam diretamente em todas as etapas do projeto. Do ponto de vista reológico, os fluidos podem ser classificados como Newtonianos e Não-Newtonianos. A Figura 1 apresenta um esquema de classificação reológica dos fluidos.

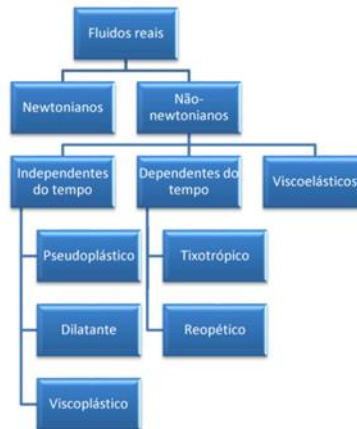


Figura 1. Esquema de classificação reológica de fluidos reais.(Galindo, 2013 apud Mothé, 2007).

Quando misturados à água os grãos de rejeito podem constituir fluidos Não-Newtonianos formados po sua dispersão no meio aquoso. Nascimento (2008) comenta que no caso das suspensões, como os rejeitos, a viscosidade é sensível à variação da concentração, à distribuição granulométrica das partículas, à forma das partículas e a qualquer outro fator que modifique o nível de agregação das partículas, tais como a presença de sais, agentes dispersantes ou mudança de pH. A Figura 2 apresenta o comportamento de vários modelos reológicos.

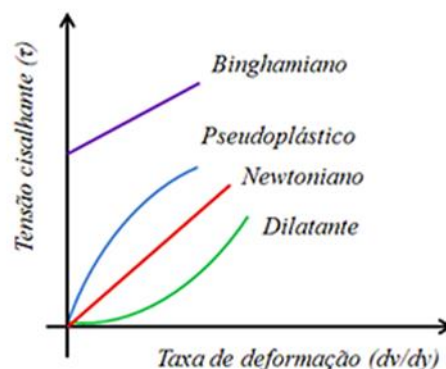


Figura 2. Modelos reológicos Newtoniano e Não-Newtonianos.(Galindo, 2013 apud Mothé, 2007).

Boger (2013) comenta que as suspensões dos rejeitos em água normalmente constituem fluidos que apresentam tensão de escoamento. O autor comenta ainda que a relação reológica (τ versus $\dot{\gamma}$) de cada rejeito é única e dependente das características físicas e químicas de superfície de cada material, entretanto, pela simplicidade matemática, o modelo de Bingham é normalmente o que melhor se aplica para modelar o comportamento reológico de rejeitos.

Os rejeitos podem ser dispostos na forma de polpa, pasta e torta, sendo normalmente classificados de acordo com da concentração de sólidos.

Slottee e Johnson (200?) relatam que em função das restrições que as altas viscosidades dos rejeitos espessados e em pasta apresentam o sucesso da aplicação das tecnologias requer uma abordagem diferente, integrando o dimensionamento dos sistemas de espessamento, bombeamento e disposição. Os autores comentam ainda que para a disposição convencional de rejeitos em polpa de baixa densidade esta integração não é significativamente crítica ao sucesso do projeto, o que justifica a abordagem das disciplinas de maneira isolada ter, historicamente, funcionado com pequenas restrições. A Figura 3 apresenta a metodologia de dimensionamento de sistemas de disposição de rejeito em pasta.

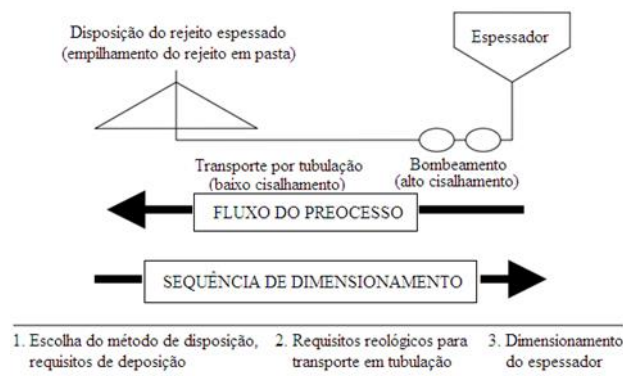


Figura 3. Método de dimensionamento de sistemas de rejeitos espessados e em pasta. (Adaptado de Slottee e Johnson , 200?)

A metodologia empregada por Slottee e Johnson integra, portanto, o dimensionamento da estrutura de disposição com os requisitos de resistência para transporte na tubulação, tornando a reologia um parâmetro crítico de projeto.

Outro fator determinante ao sucesso do projeto de estruturas de rejeitos em pasta é a previsão ângulo de deposição dos rejeitos. Laudrialt (2002) apresenta o esquema da Figura 4 onde é possível observar as distintas possibilidades de disposição em superfície de rejeitos em polpa e em pasta combinados com diferentes condições topográficas. O conhecimento do comportamento reológico dos rejeitos é fundamental para subsidiar uma boa previsão dos ângulos de deposição.

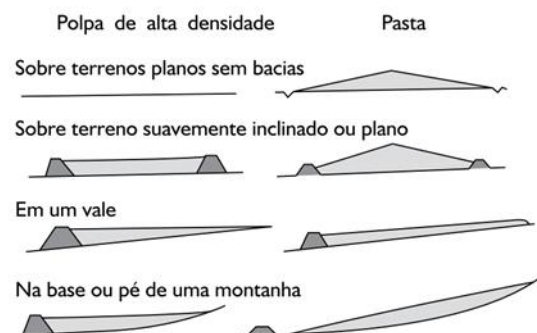


Figura 4. Características da disposição em superfície quanto à consistência. (Adaptado de Laudrialt, 2002).

Li, Been, Ritchie e Welch (2009) resumiram características de várias estruturas de rejeito em pasta em operação no mundo. Os autores mostraram que os ângulos de deposição medidos em campo variam de 1° a 11° , sendo estes profundamente dependentes da concentração do rejeito disposto e, conseqüentemente, da reologia correspondente.

Adicionalmente, existe uma grande demanda de metodologias para a determinação de propriedades reológicas dos rejeitos, de modo a formar subsídios aos estudos dos impactos das rupturas hipotéticas de estruturas de contenção, implementando as parcelas de resistência viscosa na rotina de cálculo do fluxo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No âmbito deste trabalho foram realizados ensaios de laboratório visando caracterizar um rejeito fino de minério de ferro e avaliar seu comportamento reológico. A metodologia desenvolvida consistiu na realização de ensaios de palheta, ensaios de Slump e ensaios em um equipamento viscosímetro rotacional de palheta, para vários teores de sólidos da mistura do material.

2.1 CARACTERIZAÇÃO

O rejeito utilizado para as análises é proveniente do processo de beneficiamento do Minério de Ferro, podendo ser classificado como um rejeito fino.

A Tabela 01 apresenta um resumo das principais características geotécnicas apresentadas pelos rejeitos.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos de caracterização do rejeito de Minério de Ferro

Descrição		Unidade
Massa específica dos grãos	3,58	[g/cm ³]
Limite de Liquidez (WL)	15	[%]
Limite de Plasticidade (WP)	11	[%]
Índice de Plasticidade (IP)	4	[%]
Índice de vazios mínimo	0,81	-
Índice de vazios máximo	2,52	-

O gráfico da Figura 5 apresenta as análises granulométricas para o rejeito com e sem defloculante no ensaio de sedimentação.

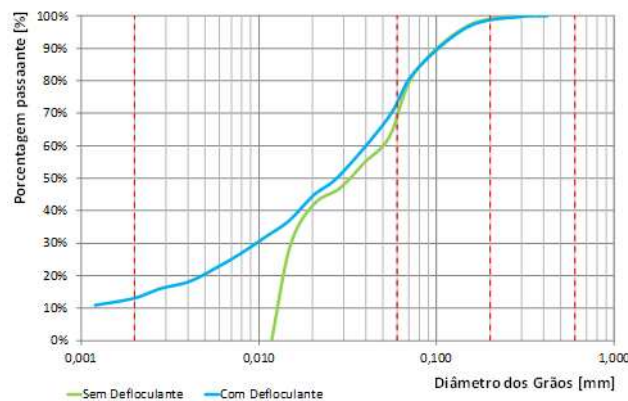


Figura 5. Análises granulométricas para o rejeito de minério de ferro.

As análises granulométricas realizadas permitem mostrar que o rejeito de minério de ferro é fino, contendo entre 70 e 73% de material passando da #200.

A Figura 6 apresenta uma imagem retirada da análise de microscopia eletrônica de varredura, realizada nos rejeitos analisados no laboratório de microscopia eletrônica da UFMG.

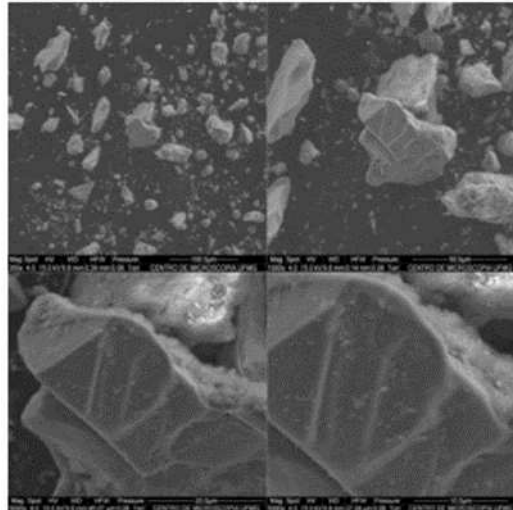


Figura 6. Análise de microscopia eletrônica de varredura nos rejeitos de minério de ferro.

Através da Figura 6 é possível observar que os grãos do rejeito possuem formatos alongados com arestas bem definidas. Esta característica física dos grãos pode influenciar o desenvolvimento da resistência ao cisalhamento e forças viscosas nos rejeitos, com uma tendência de aumentar o atrito entre grãos.

Para o rejeito em análise foram também realizados ensaios de compactação proctor normal, conforme apresentado na Figura 7.

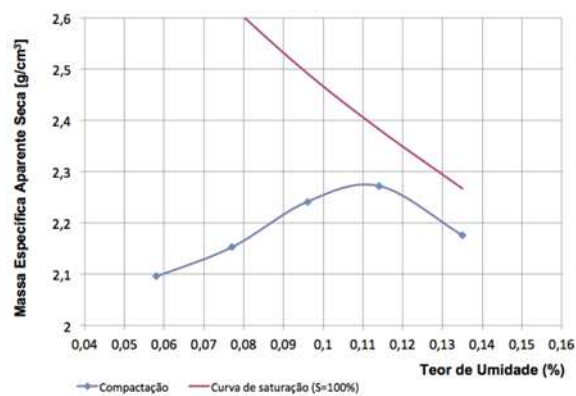


Figura 7. Curva de compactação Proctor Normal do rejeito de minério de ferro.

2.2 ENSAIO SLUMP

Os ensaios de Slump test representam um bom ponto de partida para a avaliação reológica dos rejeitos em laboratório, uma vez que através dele obtém-se sensibilidade em relação à consistência do rejeito, de maneira a guiar o desenvolvimento dos outros ensaios.

O ensaio de Slump realizado seguiu a metodologia descrita por Pashias (1996), utilizando-se portanto a geometria cilíndrica. A metodologia de Pashias (1996) permite calcular a tensão de escoamento dos rejeitos através da Equação 01.

$$\tau_{y'} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{S'} \quad (1)$$

Em que:

- S' é o “slump” adimensional obtido pela razão do “slump” real pela altura da amostra. ($S' = S/H$);
- $\tau_{y'}$ é a tensão de escoamento adimensional obtida através da razão entre a tensão de escoamento real e o termo ρgh . ($\tau_{y'} = \tau_y / \rho g H$);
- H é a altura da amostra;
- ρ é a massa específica da suspensão;
- g é a aceleração da gravidade;

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de SlumpTest realizados.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de SlumpTest realizados nos rejeitos.

Teor de sólidos Volumétrico _Cv [%]	Massa específica ρ_s [kg/m ³]	Slump_S [mm]	Tensão de escoamento τ_y [Pa]
32,5%	2000,75	243	0,00
45,0%	2183,52	232	59,59
50,0%	2289,28	223	114,70
52,5%	2350,55	186	350,52
55,0%	2442,30	147	646,89
57,5%	2474,15	78	1278,21
60,0%	2542,47	45	1726,33
65,0%	2675,36	15	2396,53

A partir dos ensaios de Slump foi construída a curva de tensão de escoamento vs teor de sólidos para o rejeito, conforme apresenta a Figura 8.

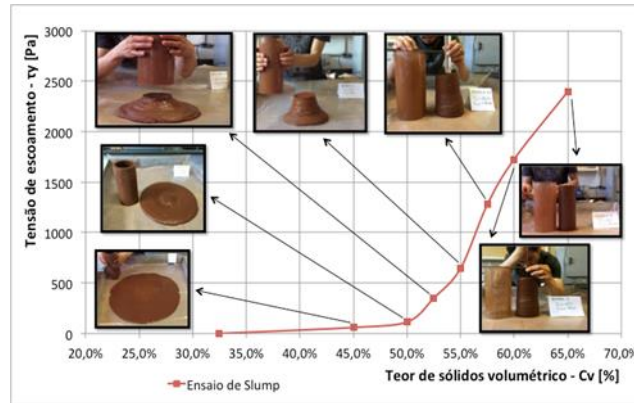


Figura 8. Resultado dos ensaios de Slump Test.

2.2 ENSAIO DE PALHETA (MINI VANETEST)

Para o desenvolvimento dos ensaios de Mini Vane foi preparada uma amostra de aproximadamente 20.000,0cm³ em um recipiente com altura de 20cm e diâmetro de 35,5cm. O preparo de uma amostra de grande dimensão foi realizado de maneira a procurar reduzir os efeitos de contorno das paredes do recipiente nesse tipo de ensaio em laboratório. O equipamento utilizado foi um torquímetro Humboldt Modelo H-4227.

A Figura 9 apresenta uma imagem do rejeito preparado dentro do recipiente, durante a realização de um ensaio.



Figura 9. Execução do ensaio de Mini Vane.

A execução do ensaio exigiu o uso de duas palhetas diferentes, face à grande variação de resistência medida para os diferentes teores de sólidos, de maneira a garantir a precisão das medidas. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de VaneTest realizados.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de VaneTest.

Teor de sólidos Volumétrico Cv [%]	Massa específica ρ_s [kg/m ³]	Tensão de escoamento τ_y [Pa]
57%	2472,46	450,00
54%	2387,24	231,25
51%	2317,12	37,40
49%	2269,25	24,20
48%	2237,06	14,75
47%	2217,58	10,60
45%	2158,44	6,00

A Figura 10 apresenta a curva de tensão de escoamento vs teor de sólidos para o rejeito, obtida através dos ensaios de Vane Test.

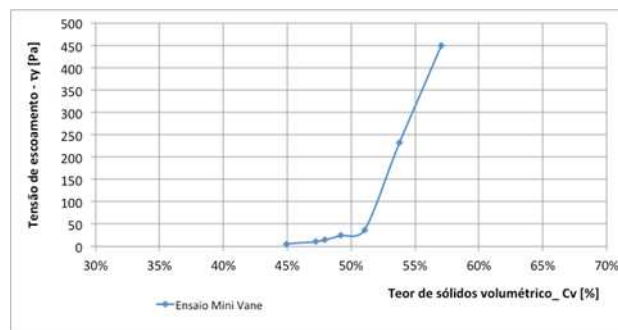


Figura 10. Resultado dos ensaios de Vane Test.

2.4 VISCOSÍMETRO ROTACIONAL DE PALHETA

O desenvolvimento de ensaios reológicos em viscosímetros na maioria das vezes consiste na aplicação de velocidades constantes (que se associam a taxas de cisalhamento ($\dot{\gamma}$)) e medição da resistência ao cisalhamento desenvolvida, sendo, portanto, ensaios de deformação controlada. Para atingir este objetivo os equipamentos de viscosímetros e reômetros são, normalmente, servo controlados, o que resulta em altos custos e complexidade de operação.

No âmbito deste trabalho foi desenvolvido um equipamento viscosímetro, adaptado do inicialmente proposto por Bryant et al. (1983). O equipamento desenvolvido consiste em um cilindro dotado de palhetas externas que gira em um eixo dentro de outro cilindro, este dotado de palhetas internas. O

uso das palhetas consiste na tentativa da eliminação dos efeitos de deslizamento entre os rejeitos e o aço (material de construção do equipamento), conforme discutido por Boger (2013). A Figura 11 apresenta uma seção através do equipamento.

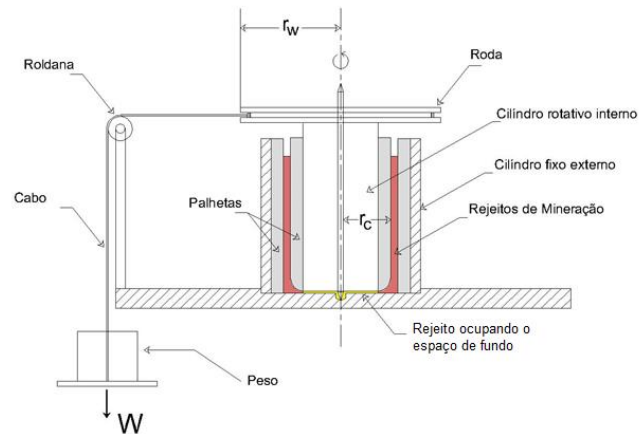


Figura 11. Seção transversal do equipamento viscosímetro construído.

Conforme apresentado na Figura 11 o equipamento desenvolvido funciona através da rotação do cilindro interno, que é preso a uma roda, ou peão, que permite a aplicação de um torque, proveniente de um peso (W), consistindo portanto, em um ensaio de tensão controlada.

A Figura 12 apresenta um esquema tridimensional das peças do viscosímetro.

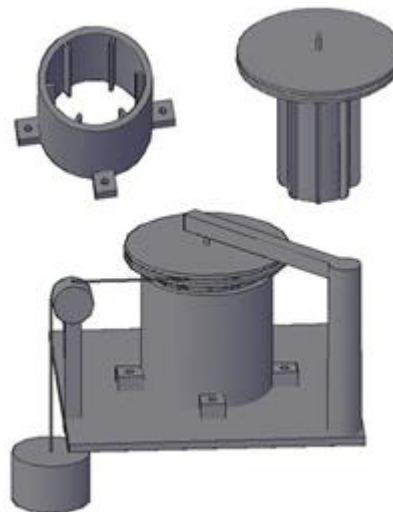


Figura 12. Visualização tri-dimensional do viscosímetro rotacional de palheta.

A Figuras 13 apresenta fotos do equipamento e o detalhe do rejeito dentro do equipamento

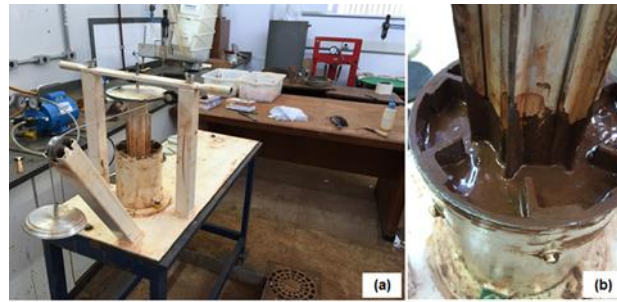


Figura 13. Fotos do viscosímetro construído a) vista geral do equipamento no laboratório da UFMG.

b) detalhe do rejeito com teor de sólidos $C_v=30\%$ dentro do viscosímetro.

Para o monitoramento do movimento do viscosímetro foi utilizada câmera de vídeo com capacidade de capturar até 240frames por segundo. A roda superior, acoplada ao cilindro interno foi então instrumentada com balizas a cada 30° . A precisão da medida do instrumento ficou então limitada à precisão da câmera, que registra uma imagem a cada $0,0041s$. Desta maneira, considerando o balizamento a cada 30° e o raio da roda igual a $0,0935m$ pode-se calcular velocidade máxima de monitoramento do equipamento igual a aproximadamente $12,5m/s$. As velocidades monitorada no equipamento não ultrapassaram $5m/s$.

De uma maneira simplificada o monitoramento do movimento do viscosímetro desenvolvido para cada peso é realizado de maneira a se obter a velocidade terminal constante, considerada como valor de contorno à solução do problema.

A Figura 14 apresenta as curvas de deslocamento vs tempo monitoradas para os ensaios com pesos de (0,57; 1,02 e 1,52 kg) para o rejeito com teor de sólidos volumétrico $C_v=39,5\%$.

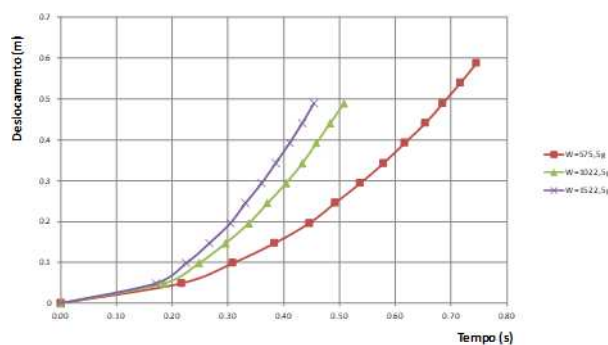


Figura 14. Curvas de deslocamento vs tempo para os ensaios realizados no rejeito ($C_v=45\%$).

A partir do gráfico da Figura 14 é possível observar que as curvas tendem a um trecho reto após um tempo de rotação. A determinação da velocidade terminal desenvolvida para cada caso foi então realizada através do cálculo da inclinação do trecho reto de cada curva da Figura 14. A análise realizada

para a escolha dos pontos em cada caso foi visual, entretanto, na maioria dos casos as últimas quatro medições foram suficientes para calcular a velocidade com precisão.

Uma vez realizada a análise das velocidades terminais constrói-se o gráfico do peso (W) vs velocidade terminal (vt), conforme apresentado na Figura 15, para os ensaios em CV=39,5%.

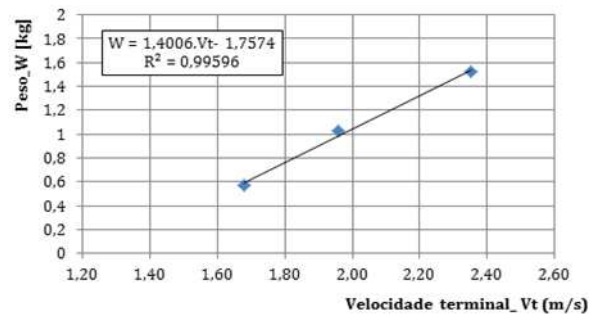


Figura 15. Gráfico de Peso vs velocidade terminal para Cv=39,5%.

É possível observar que as velocidades de rotação do equipamento situam-se abaixo de 2m/s, garantindo a precisão das medidas. Uma vez realizada a regressão linear dos pontos da Figura 15 pode-se obter a inclinação (m) e o intercepto (b).

A descrição teórica do movimento do equipamento foi apresentada por Bryant et al. (1983), através da qual foi possível determinar as Equações 2 e 3, desenvolvidas para a geometria específica do equipamento construído.

$$n_p = \frac{m}{(4,079 - 20,91d)} \quad (2)$$

$$\tau_y = \frac{b}{(0,028 - 0,1424.d)} \quad (3)$$

Através da repetição dos ensaios para vários teores de sólidos pôde-se construir a Tabela 4, que sumariza os resultados obtidos nos ensaios de viscosímetro rotacional.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de viscosímetro rotacional de palheta.

Teor de sólidos Volumétrico Cv [%]	Massa específica ρ_s [kg/m ³]	Tensão de escoamento τ_y [Pa]	Viscosidade Plástica η_p [Pa.s]
21.8%	1563.25	19.36	0.15
28.7%	1740.92	28.93	0.19
34.7%	1895.38	38.18	0.22
40.2%	2037.22	64.23	0.39
39.5%	2018.60	71.26	0.39
50.3%	2297.18	121.94	0.66
55.3%	2425.93	602.82	2.69

A partir da Tabela 4 pôde-se determinar a curvade tensão de escoamento vs teor de sólidos e viscosidade plástica vs teor de sólidos para o rejeito, conforme apresentado nas Figura 16 e 17.

Os resultados do viscosímetro permitiram calcular com precisão a resistência desenvolvida nos rejeitos para teores de sólidos volumétricos abaixo de 35%, o que não foi possível com a utilização dos ensaios de Slump e Mine Vane.

A representação gráfica dos resultados do viscosímetro pode ser realizada de várias maneiras, a Figura 18 abaixo apresenta o gráfico da viscosidade e tensão de escoamento em escala semi logarítmica, conforme proposto por Bryant et al. (1983).

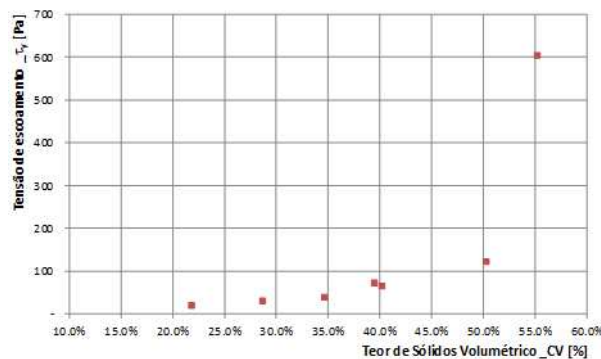


Figura 16 . Resultado dos ensaios no viscosímetro pra Tensão de escoamento vs teor de sólidos.

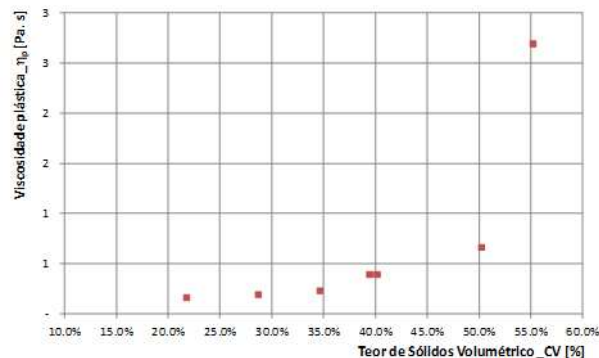


Figura 17. Resultado dos ensaios no viscosímetro pra viscosidade vs teor de sólidos.

A Figura 18 permite avaliar o paralelismo entre as curvas de tensão de escoamento vs índice de vazios e linhas de e viscosidade plástica vs índice de vazios. De fato Bryant et al. (1983) já indicavam o paralelismo entre as curvas.

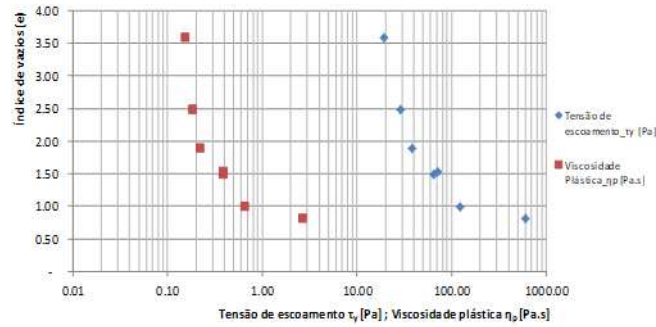


Figura 18. Curvas de Tensão de escoamento e viscosidade plástica vs índice de vazios.

3 COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS

Como forma de avaliar os resultados do viscosímetro construído foi realizada a comparação das curvas tensão de escoamento vs teor de sólidos para os todos os ensaios realizados. A Figura 19 apresenta o gráfico de comparação dos resultados.

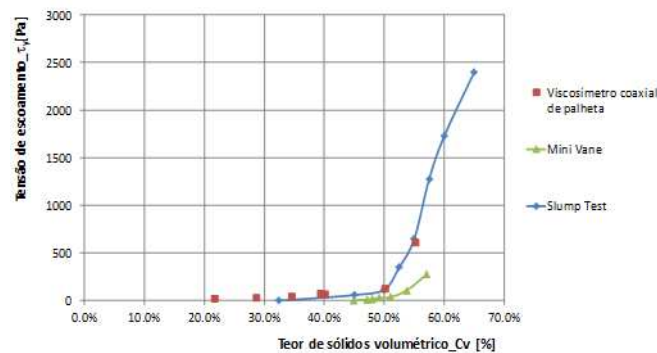


Figura 19. Comparação dos resultados dos ensaios realizados.

Através do gráfico da Figura 19 é possível observar a concordância dos resultados dos ensaios de SlumpTest e do viscosímetro, tendo o ensaios de Mini Vane apresentado resultados com resistências menores para cada teor de sólidos volumétrico.

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma forma simples e barata para a determinação da reologia de rejeitos de mineração. Trata-se de um aparelho de baixo custo e baixa complexidade de manuseio, apropriado para uso contínuo dentro da própria mineração. Os resultados fornecidos foram coerentes com aqueles obtidos via “slumpstest”, e precisam ser agora confrontados com os fornecidos por viscosímetros padrões. Contudo, os resultados mostraram que a metodologia desenvolvida permite avaliar a curva de reologia dos rejeitos, dentro de um determinado intervalo de teores de unidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG e à FINEP pelo apoio para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

Boger D. V. (2013). Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry. The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. p. 239-257.

Bryant, S.M., Duncan, J.M., and Seed, H.B. 1983. Application of tailings dam flow analyses to field conditions. Report UCB/ GT/83-03, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California.

Laudriault, D. (2002). The surface disposal of industrial waste: slurry placement v/s high density slurry placement v/s placement as a paste. In: High Density & Paste Seminar. Santiago, Chile. Apresentações Digitais.

Li A., Been K., Ritchie e Welch, D. (2009). Stability of Large Thickened non-Segregated Tailings Slopes. 12th. International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Chile.

Nascimento C.R. (2008). Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Mineraias. Série Rochas e Mineraias industriais, CETEM/MCT. . Rio de Janeiro, RJ, 53p.

Slottee, J.S. e Johnson, J. (200?). Paste technology: Success is in the approach. Disponível em <http://www.pastethickassoc.com/templates/articles/Paste%20technology%20%20success%20is%20i n%20the%20approach.pdf>. Acessado em 20 Agosto de 2014, 6p.

Pashias, N., Boger, D.V, Summers, J. Glenister D.J. (1996). A fifty cent rheometer for yield stress measurement, J. Rheol. 40p. 1179–1189.