

Retroanálise de Rompimento de Barragem de Disposição de Rejeito de Minério de Ferro

Luiz Eduardo Moura Pereira

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, luizedmoura@gmail.com

Lúcio Flávio de Souza Villar

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, lvillar@etg.ufmg.br

RESUMO: Com o crescimento da atividade mineradora, a necessidade de volumes cada vez maiores para a disposição de rejeitos torna o estudo de tais materiais fundamental para garantir a segurança da estrutura. Porém, um estudo que contemple as várias características dos rejeitos ainda não foi consolidado, sem, assim, necessária uma análise ainda superficial de suas propriedades na concepção de projetos. Com isso, Ribeiro (2015) propõe uma metodologia que une as propriedades geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro com suas características reológicas, criando um cenário onde se pode estudar o evento da ruptura de uma estrutura de contenção de rejeitos tanto no seu aspecto estático quanto no seu aspecto dinâmico, relacionado ao fluxo de rejeito pós ruptura. Esse trabalho visa aplicar a metodologia proposta a um evento de ruptura ocorrido na barragem B1 da Herculano Mineração, no município de Itabirito, MG. O rejeito da barragem foi caracterizado e ensaiado para a determinação de suas características geotécnicas e reológicas. A geometria da ruptura da barragem B1 foi analisada por meio de fotografias e imagens de satélites, além de laudos, para se obter parâmetros geométricos do acidente. Com isso procedeu-se a uma modelagem computacional no *software* DAN-W para averiguar o avanço da fluxo e compará-lo ao real.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de minério de ferro, rompimento de barragem, metodologia, reologia.

1 INTRODUÇÃO

A atividade de extração de minerais gera grande quantidade de resíduo que, hoje, não têm utilidade comercial e são, por isso, dispostos. Esse material, o rejeito, é abundante na atividade extrativa e vem do beneficiamento do minério. No caso da extração do minério para a obtenção do ferro, o rejeito gerado não é tóxico, porém é gerado em quantidade, gerando um problema não somente econômico para a empresa, mas também ambiental e jurídico, uma vez que são necessárias grandes áreas para a sua disposição.

Assim, visando reduzir custos e impactos ambientais, os rejeitos são transportados por via úmida e depositados em reservatórios formados por barramento, muitas vezes, construídos com

o próprio rejeito iniciando-se por um dique de partida. Para sua construção, em muitos casos, é usado o método de alteamento para montante, em que cada alteamento da barragem é feito para montante, fazendo com que o rejeito da praia seja parte da fundação de cada alteamento. Outra característica são as grandes alturas que as barragem vêm tomando, uma vez que o licenciamento ambiental torna-se moroso e complexo.

Tendo em vista o exposto, não são raras as falhas desse tipo de barramento: somente em Minas Gerais foram vistos 3 falhas nos últimos 10 anos, gerando perdas econômicas, ambientais e humanas.

Tendo em vista o problema das rupturas em barragens de rejeito de minério de ferro e a falta de um método que abrangesse as propriedades

geotécnicas e reológicas de tais rejeitos bem como as características geométricas do processo de ruptura da barragem, Ribeiro (2015) propôs um método para avaliar as rupturas em tais barragens.

Nesse trabalho, tal método será usado para se avaliar a ruptura da barragem B1 da Herculano Mineração, localizada no município de Itabirito, Minas Gerais. A metodologia proposta por Ribeiro (2015) se confunde com a metodologia de execução desse trabalho, sendo, muitas vezes, tratadas como uma só, mas respeitando-se as devidas propriedades intelectuais.

2 TEORIA

Os rejeitos são dispostos nas estruturas de contenção por meio hídrico. Assim, sua disposição gera, de forma imediata, uma segregação, na qual os rejeitos mais pesados, de acordo com Santos (2004), tendem a ficar na praia (local próximo ao barramento) e os mais leves tendem a ir para o lago (mais a montante do barramento) – uma vez que se têm os canhões posicionados na crista da barragem. Isso gera uma zona de baixa permeabilidade próxima ao barramento.

Já de acordo com Villar (2002), os rejeitos depositados principiam um estado de sedimentação e adensamento, que provoca a perda de água em camadas, levando cada camada a ter características distintas com o tempo. Além disso, as camadas, à medida que perdem água, passam a apresentar trincas. Porém, quando há o rompimento de uma dessas estruturas, o rejeito, que se comportava como um material elástico passa a apresentar um comportamento viscoplástico, uma vez que suas deformações são excessivas e forças internas provenientes dos grãos geram forças contrárias ao movimento. Tais forças são a força viscosa e a tensão de cisalhamento. A força relacionada à viscosidade somente atua quando há movimento relativo entre as partículas (Bryant, 1983).

Com isso, o fluxo dos rejeitos não pode ser analisado usando-se a física Newtoniana dos fluidos. Nesse trabalho, o método de análise do fluido será o proposto por Bingham, Figura 1.

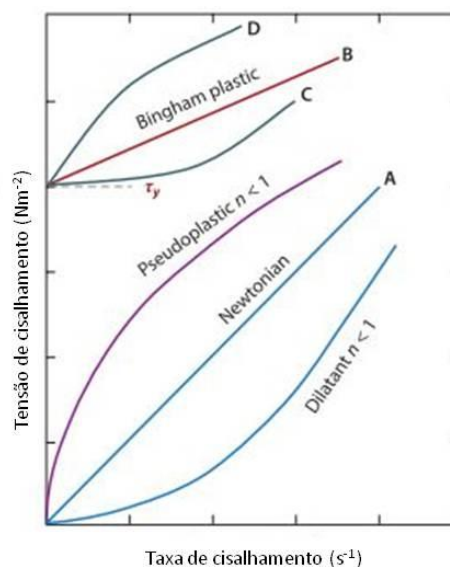


Figura 1 – Métodos de fluxo (BORGER, 2013)

Outro fator importante é a estimativa do volume que escoará. Um proposta feita por Blight (2010) considera a área (em planta) da ruptura como sendo elíptica. Ribeiro (2015) considerou essa proposta e acrescentou dados estatísticos de históricos de rompimentos para propor uma fórmula para o cálculo desse volume (V_f):

$$V_f = 0,25 \cdot \pi \cdot B \cdot H^2 \cdot [\cot(64,932 \cdot N^{-0,742}) + \cot \alpha] \quad (1)$$

Com:

- B = metade do eixo menor (m);
- H = altura da barragem (m);
- A = inclinação do barramento (°);
- N = número de estabilidade.

O fator N pode ser obtido pelo gráfico de Morgenstern ajustado, Figura 2, basta que se tenha o ângulo estável do rejeito (i). Esse ângulo representa o estado de inércia do rejeito após ele parar, depois de entrar em fluxo originado de um rompimento da barragem.

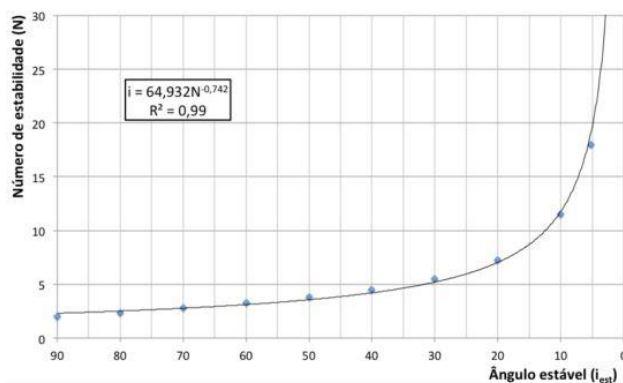


Figura 2 - Ábaco de Morgenstern ajustado (RIBEIRO, 2015)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente necessita-se, para a execução do método, de ser caracterizar o rejeito. Assim, obteve-se uma volumosa amostra do rejeito da barragem, que foi seca ao ar e ensaiada, segunda normas da ABNT, para a aquisição de seus parâmetros geotécnicos padrões, sendo a granulometria feita em duas condições: com e sem defloculante. Além dos ensaios padrões, foram realizados os ensaios de índice de vazios máximo e mínimo.

Além dos ensaios geotécnicos, foram feitos quatro ensaios reológicos. O ensaio de *Slump Test* foi feito em cilindro de acrílico para uma gama de concentrações de sólidos, Figura 3. Esse ensaio foi usado como parâmetro para se escolher as concentrações dos ensaios posteriores.

Após se escolher as concentrações, fez-se o ensaio de palheta (*vane test*). Para tal ensaio, foi confeccionada uma palheta maior, tendo em vista que se necessitava de maior precisão por conta da fluidez de algumas concentrações.

Para esse ensaio, foi usado um recipiente de grandes diâmetros, uma vez que se queria atenuar os efeitos de borda, Figura 4.

Depois fez-se o ensaio de viscosímetro coaxial de palheta (VCP) em aparelho desenvolvido por Ribeiro (2015). Nesse ensaio o rejeito é posto em uma câmara com um cilindro central que gira em seu eixo. Na parte externa do cilindro centro e na parte interna da câmara há palhetas que garantem o cisalhamento do rejeito e não deste com as paredes da câmara. O giro do peão central é feito por meio da queda de um peso. Foram

usadas várias massas para se obter diferentes velocidades angulares. A Figura mostra o aparelho usado. Os dados foram coletados por câmera lenta (240 fps) e analisados *frame a frame*.



Figura 3 - Viscosímetro coaxial de palheta

O último ensaio reológico feito foi o ensaio de flume. O rejeito foi colocado no reservatório da câmara, em diversas concentrações. A porta foi aberta e o rejeito escoou pela calha sob diversos ângulos. A Figura 3 mostra o equipamento. O movimento foi gravado também em câmera lenta e o ensaio foi, da mesma forma, analisado. Porém, após a coleta dos dados de velocidade e distância, o ensaio foi modelado no *software* DAN-W, para se obter os resultados. Assim, considerou-se satisfatória a modelagem quando se conseguia que o rejeito percorresse a distância até parar (ou até atingir a borda da calha) no tempo aferido no ensaio.

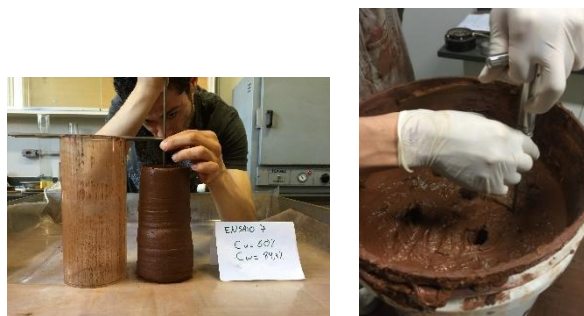


Figura 4 - Ensaios de Slump (esquerda) e vane (direita)

O programa DAN-W foi escolhido pois, nele é possível, implementar características geométricas e reológicas não-newtoneanas.

Hungr (1995) propôs um programa que divide o fluxo em colunas nas quais são aplicadas as equações que descrevem o movimento de cada uma das delas. Para tal, o programa calcula a força e a velocidade de cada uma. Com isso, tem-se sua nova posição e a nova altura da coluna. Para se rodar o programa deve-se nutrí-lo com parâmetros de entrada, que dependem de qual modelo será usado para reger o fluxo do material.

O programa considera as forças atuantes entre as partículas, atritos de fundo e laterais e pressões atuantes no sistema.



Figura 3 – Equipamento para o ensaio Flume

Todos os ensaios reológicos buscaram a obtenção dos dados de força de cisalhamento e viscosidade plástica. Para o ensaio de *flume*, tais dados foram obtidos por “tentativa e erro”, mantendo-se peso específico como entrada constante do programa (para a mesma concentração) e variando a tensão e a viscosidade até se considerar modelagem satisfatória, pelos parâmetros supracitados. Assim, obteve-se, de forma indireta, esses fatores.

Já a geometria da ruptura da barragem foi analisada por meio de registro fotográfico, imagens de satélite e laudos. Com isso, pode-se estimar a largura da brecha, da calha por onde o rejeito transladou, a altura da barragem, a área (em planta) do reservatório afetada pela ruptura e o alcance do rejeito. Com esses dados pode-se, por geometria, determinar a inclinação do talude do barramento e o ângulo de equilíbrio do rejeito rompido; além de se poder estimar o volume extravasado.

Tal volume foi estimado tanto pela equação já citada quanto pela geometria, uma vez que a superfície de ruptura (em planta) da barragem estudada não foi elíptica, já que havia uma linha de fragilidade composta pelas baias. Assim, a área de ruptura se deu em formato aproximadamente retangular, como pode ser visto na Figura 6.

Com esses dados, fez-se o modelo da barragem no DAN-W, bom como a calha de escoamento. Essa calha foi escolhida como um trecho reto e de largura constante e compreende o trecho que se estende da barragem até as proximidades da barragem B2. Os dados de entrada do programa ainda contemplam o peso específico do rejeito que escoou sua viscosidade, tensão de cisalhamento e ângulo de atrito (cujo peso na análise verificou-se ser baixo). O peso específico foi de difícil estimativa, uma vez que a barragem fora fechada, mas ainda recebia os rejeitos em baias sobre sua superfície e era percolada por água que infiltrava à montante.



Figura 4 - Vista da superfície de ruptura (SEÇÃO DE SEGURANÇA E SAÚDE DO TRABALHADOR, 2014)

4 O CASO

A Figura 7 mostra a região do acidente. Pelo relatório da Seção de Segurança e Saúde do Trabalhador (2014) a barragem B1 não deveria mais receber material. Porém, nela foram construídas quatro baias que recebiam o rejeito que ficava até sua sedimentação, quando era tirado por caminhões e escavadeiras e depositado em área logo a montante das baias.

Esse uso indevido se deu pois a barragem B4, construída para a continuação das atividades minerárias, foi paralisada pois havia uma drenagem de água não planejada que secou a barragem. O fluxo dessa água, mais tarde, foi estudado e descobriu-se que ia em direção à região logo a montante da barragem B1, local onde eram depositados os rejeitos das baias, uma vez nelas sedimentados. A água sobrenadante das baias era encaminhada para a barragem B3.

Outro processo indevido, de acordo com o relatório, era a retirada do “pé do talude” da barragem B1 para minerá-lo, uma vez que possuía boa concentração de ferro.



Figura 5 - Mina onde houve o rompimento (SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE REGULARIZAÇÃO AMBIENTAL CENTRAL METROPOLITANA, 2014)

Assim, no dia dez de setembro de 2014 a barragem, que tinha percolação de água pela sua fundação, rompeu, matando três operários, ferindo outros sete e deixando um rastro de destruição ambiental a jusante. Esse acidente levou à empresa a pagar indenizações e foi movido contra os envolvidos ações judiciais por homicídio e danos ambientais.

5 RESULTADO

A caracterização dos rejeitos forneceu a Tabela 1 com os resultados das análises.

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos (RIBEIRO, 2015)

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa específica dos grãos	3,58	g/cm ³
Limite de Liquidez	15	%
Limite de Plasticidade	11	%
Índice de Plasticidade	4	%
Índice de Vazios Mínimo	0,81	-
Índice de Vazios Máximo	2,52	-

As Figura 8 e Figura 9 mostram os valores encontrados para os ensaios de compactação usando energia de compactação de Proctor Normal e o resultado da granulometria com e sem defloculante, respectivamente.

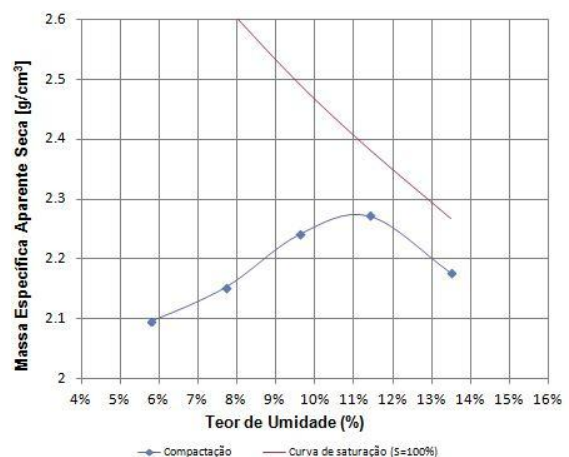


Figura 6 - Resultado do ensaio de compactação Proctor Normal (RIBEIRO, 2015)

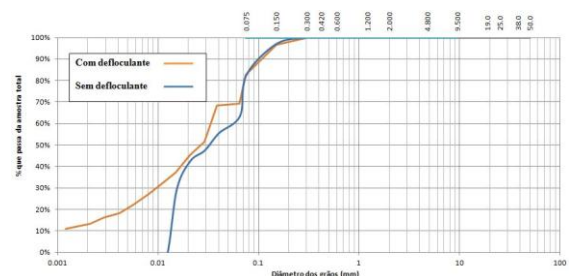


Figura 7 - Resultado da análise granulométrica (RIBEIRO, 2015)

Já os ensaios reológicos forneceram os resultados mostrados nas figuras que seguem. Todos os ensaios fornecem os mesmos resultados que serão, posteriormente, comparados, visando perceber se há boa compatibilização dos resultados. Deve-se fazer uma análise crítica tendo em vista a faixa de atuação dos ensaios em função da concentração dos rejeitos.

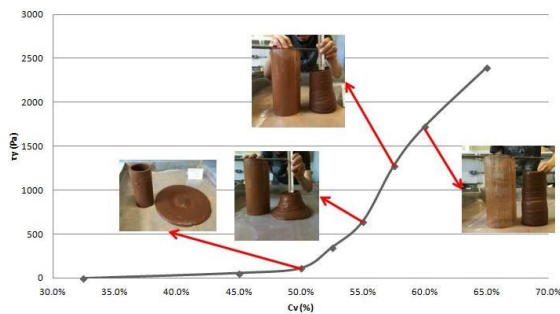


Figura 8 - Resultado do Slump Test (RIBEIRO, 2015)

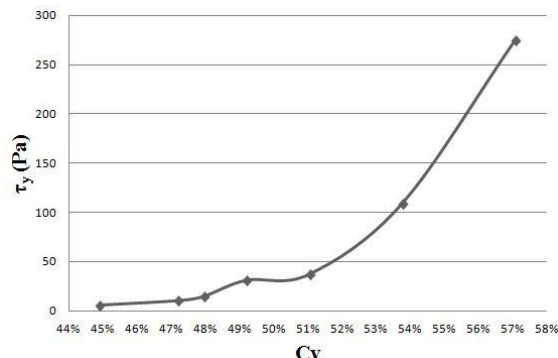


Figura 9 - Resultado do Vane Test (RIBEIRO, 2015)

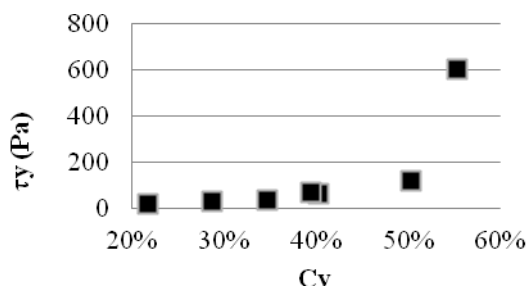


Figura 10 - Tensão de cisalhamento pelo VCP (RIBEIRO, 2015)

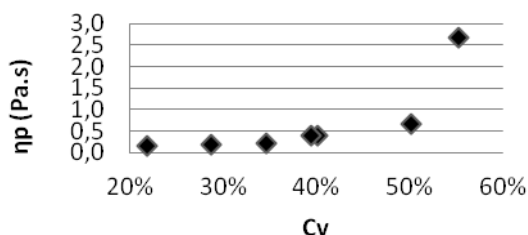


Figura 11 - Viscosidade pelo VCP (REIBEIRO, 2015)

Já para o ensaio de Flume, cujo resultado é a entrada para o *software*, a modelagem da calha é apresentada na Figura 14. Os resultados de distância e tempo foram compatibilizados entre a modelagem e o ensaio. Os resultados finais,

em termos de viscosidade e tensão são apresentados na Tabela 2.

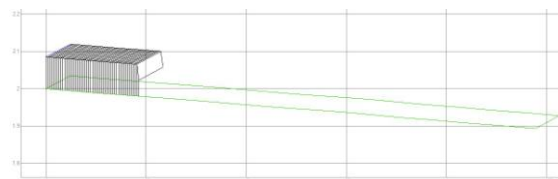


Figura 12 - Exemplo da modelagem (RIBEIRO, 2015)

Tabela 2 - Resultado do Flume (RIBEIRO, 2015)

Cv	45%				50%			
Inclinação	1°	3°	5°	10°	1°	3°	5°	10°
Peso específico (kN/m³)	21.5	21.5	21.5	21.5	22.8	22.8	22.8	22.8
Viscosidade (Pa.s)	0.3	0.3	0.25	0.4	2.3	2.4	2.1	2.1
Tensão de escoamento (Pa)	0.4	0.3	0.5	0.6	51	55	54	54

A Figura 15 e a Figura 16 mostram a comparação entre os resultados dos ensaios. Nota-se que há uma boa correlação entre os ensaios em uma faixa de concentração. Mas nos extremos há alguma divergência, mostrando que os ensaios têm um faixa de abrangência, perdendo precisão ou tendo sua metodologia de execução para certas concentrações. Note que, para o *Slump Test*, com teores muito baixos, o ensaio torna-se inviável, como mostrado pela Figura 15.

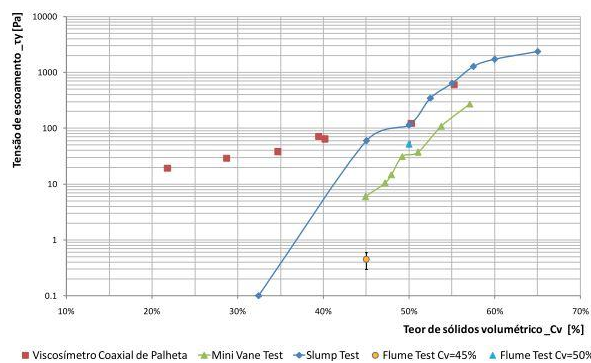


Figura 13 - Comparação dos resultados (RIBEIRO, 2015)

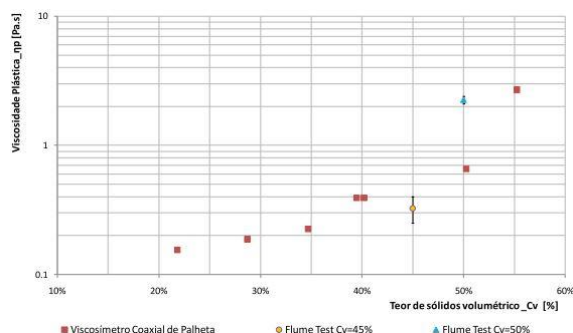


Figura 14 - Comparação dos resultados de viscosidade (RIBEIRO, 2015)

Pelas análises geométricas chegou-se ao valor de 31m de altura para a crista da barragem e a brecha formada foi de 200m de comprimento, no sentido das baías. Pelo ábaco encontrou-se $N=2^\circ$ uma vez que o ângulo estável é de $5,0^\circ$ com ângulo do barramento de $6,0^\circ$. O valor do eixo menor da elipse foi considerado como a metade da largura da brecha, ou seja, 100m. Com isso chegou-se ao valor de 1.33 milhões de m^3 pela equação e 2,01 milhões de m^3 por geometria, diferença que representa 33%. Assim, nota-se que a diferença entre a geometria elíptica e a retangular impacta em considerável diferença de volume escoada para um acidente de rompimento de barragens. A calha por onde essa massa escoou foi medida em 140m de largura e foi considerada com 297m do dique de partida do barramento até o último ponto considerado para o escoamento do rejeito. Vale notar que o rejeito tomou três direções quando alcançou a parte mais baixa do relevo, como pode ser visto pela Figura 17. As mudanças de trajeto não foram modeladas, somente a trajetória retilínea, que termina pouco antes da barragem B2.

A corrida se dá a jusante, no sentido das setas mostradas na Figura 17. No escopo desse trabalho, foi considerada a seta de maior comprimento, ou seja, a primeira etapa do escoamento, que parte do barramento até o ponto onde o fluxo se divide. Essa escolha foi feita por dificuldade de determinação da geometria das áreas das calhas após a divisão.

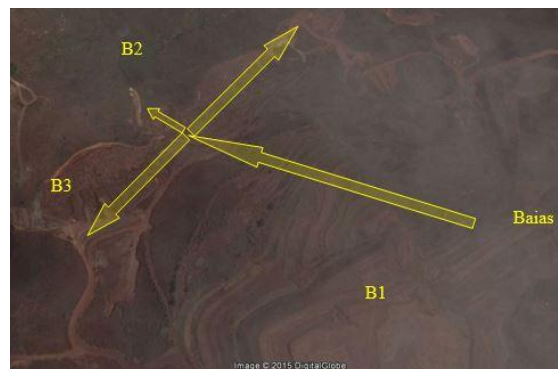


Figura 15 - Trajeto do fluxo (GOOGLE EARTH, 2014 - modificado)

Com todos os resultados e análises pode-se modelar o acidente no DAN-W e verificar sua resposta. A modelagem, a princípio falhou, uma vez que o rejeito conseguiu um alcance muito superior ao observado em campo. Para se conseguir que o alcance fosse o mesmo, os parâmetros de entradas foram alterados, fazendo-se iterações e rodando o programa com vários valores de tais entradas. Assim, mudou-se os parâmetros para se chegar ao alcance correto, visto na Figura 18 e se construiu a Tabela 3. Nela pode-se notar que a tensão de cisalhamento está na mesma ordem de grandeza, porém a viscosidade está três ordens de grandeza maior na modelagem. Mostrando que há algo errado em como o modelo foi feito.

Pela Tabela 3, nota-se que há certas discrepâncias entre os valores estimados e medidos. Essa diferença se dá pela dificuldade em se modelar o fundo da calha no programa, uma vez que há vegetação na área e certas mudanças topográficas que não se pôde dimensionar pelas imagens conseguidas. Além disso, uma certa quantidade de material tomou outras direções, o que também afeta o modelo, já que tomou-se como velocidade zero o fim do rompimento.

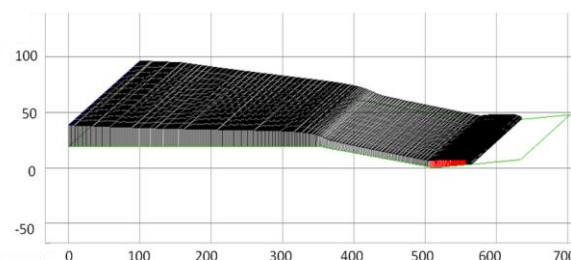


Figura 16 - Modelo da barragem já rompida

Tabela 3 - Comparação dos resultados

Parâmetro	Encontrado no DAN-W	Estimado pelos ensaios
Peso específico (kg/cm³)	30	25,46
Tensão de cisalhamento (kPa)	7.3	1.1
Viscosidade (kPa)	2.9	0,0048
Ângulo de atrito (°)	20	18

Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>.

Acesso em: 18 dez. 2015.

Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches.

Canadian Geotechnical Journal, 32(4), p. 610-623

Ribeiro, V. Q. F. (2015). *Proposta de Metodologia para Avaliação de Rupturas de Estruturas de Disposição de Rejeitos*. UFMG, Belo Horizonte, 235 p.

Santos, A. G. (2004). *Influência do Teo de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro*. Universidade Federal de Ouro Preto, 191 p.

Seção de Segurança e Saúde do Trabalhador. *Relatório de Análise de Acidente de Trabalho*. . Belo Horizonte: [s.n.], 2014.

Superintendência Regional de Regularização Ambiental Central Metropolitana. *Parecer Único Nº 211/2014*. . Belo Horizonte

6 CONCLUSÕES

A metodologia proposta por Ribeiro (2015) mostrou-se consistente com a teoria e com as características dos rejeitos de minério de ferro. Os ensaios apresentaram boa aplicabilidade, sabendo-se quais são os limites de precisão de cada um.

Já a determinação das propriedades geométricas foram dificultadas por falta de uma carta topográfica e imagens que permitissem a aferição de informações relativas à ruptura. Ainda nesse ponto, vale ressaltar que o leito da calha não é liso como o do modelo computacional, além de possuir árvores e muitas interferências quando se aproxima da parte inferior do relevo. Deve-se, ainda, ter em mente que parte do rejeito será redirecionada, uma vez que há mais dois caminhos para ele.

O volume do reservatório também pode ter sido mascarado, já que não se conhece o relevo dentro do reservatório e, no modelo, foi usado um reservatório de fundo plano e horizontal.

REFERÊNCIAS

Blight, G.(2010) *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. Londres: Taylor & Francis Grupo.

Borger, D. (2013). Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. Vol. 4, p.239-257.

DAN-W. Versão 1. Hungr Geotechnical Research, 2010.

Google Earth. Versão 7.1.5.1557. GOOGLE, 2015.