

Proposta de Metodologia para Previsão do Volume Mobilizado Em Rupturas de Estruturas de Disposição de Rejeitos

Vinícius Rodrigues Fortes Queiroga

Golder Associates Brasil Consultoria e Projetos Ltda. / Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, viniciusq.eng@gmail.com

Lúcio Flávio de Souza Villar

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

Gustavo Ferreira Simões

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

RESUMO: A necessidade de uma melhor compreensão do fenômeno de ruptura de estruturas de disposição de rejeitos ganhou mais destaque nos últimos anos, em função da ruptura de grandes barragens de rejeitos, como a barragem do Fundão localizada em Minas Gerais - Brasil e a barragem de Mount Polley localizada em British Columbia – Canadá, onde o volume de rejeitos liquefeitos movimentou-se dezenas de quilômetros para jusante, causando mortes, graves impactos ambientais e socio-econômicos. Dentre os fatores com influência no desenvolvimento do fenômeno de ruptura e magnitude de suas consequências pode-se destacar o volume de rejeitos mobilizado. O presente artigo apresenta uma proposta de metodologia para a avaliação do volume de rejeitos mobilizado durante um evento de ruptura de uma estrutura de disposição de rejeitos. Procurou-se incorporar na metodologia aspectos geotécnicos dos rejeitos, de forma a subsidiar a previsão do estado físico dos materiais depositados no reservatório e, conseqüentemente, sua resistência ao cisalhamento no caso do desenvolvimento do fenômeno da liquefação. A partir do conhecimento das propriedades geotécnicas de resistência ao cisalhamento dos materiais depositados a metodologia proposta procurou avaliar o desenvolvimento da ruptura nos rejeitos dispostos no reservatório, de modo a permitir a previsão da geomorfologia da ruptura e volume de rejeitos mobilizado. Visando avaliar a qualidade da previsão foram retroanalisados os volumes de ruptura para oito casos históricos em que a informação de volume de rejeitos mobilizado na ruptura encontrava-se disponível na literatura. Os resultados mostraram que a metodologia tem potencial para prever os volumes de ruptura com mais precisão quando comparada aos métodos existentes.

PALAVRAS-CHAVE: Ruptura, Barragem de Rejeitos, Estrutura de Disposição de Rejeitos, Volume de Ruptura, Dam Break, Liquefação.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos de rupturas hipotéticas de barragens (Dam Breaks) têm sido foco de inúmeras pesquisas nas últimas décadas.

Em um inventário realizado pelo ICOLD (2008) em 18.401 minas, a taxa de rupturas de barragens de rejeitos nos últimos cem anos pôde ser estimada em 1,2%. De acordo com Azam & Li (2010) esse valor é duas ordens de grandeza

maior que a taxa estimada para barragens de retenção de água, reportada como 0,01%.

Para barragens de contenção de água, embora não haja consenso metodológico, o conhecimento mais seguro do comportamento físico da água e das condições de contorno do problema garantiu a construção de modelos que simulam com certa acurácia o desenvolvimento do fenômeno de ruptura. Para estruturas de disposição de rejeitos o estudo das rupturas se

torna mais complexo, uma vez que a saída do material do reservatório envolve fenômenos de ruptura por liquefação e fluxo hiperconcentrado não-Newtoniano dos rejeitos liquefeitos.

Na última década diversos autores (ICOLD, 2008; BLIGHT & FOURIE, 2003; RICO *et al.*, 2008; AZAM & LI, 2010) apresentaram estudos estatísticos sobre os eventos históricos de ruptura, dando destaque a diversos fatores como, método construtivo, altura, e causa da instabilidade da barragem.

Dentre as estatísticas levantadas especial atenção tem sido dada a previsão do volume de material envolvido no caso de um evento de ruptura, entretanto, os estudos existentes utilizam correlações estatísticas que podem incorrer muitas vezes em erros de previsão de até duas ordens de grandeza. A Tabela 1 apresenta um resumo das razões “volume mobilizado/volume estocado”, obtidas em diferentes publicações. É possível observar que as médias das razões variam de 20% a 40% do volume total do reservatório. Entretanto, existem casos isolados em que todo o material contido foi mobilizado no fluxo.

Tabela 1 - Razões entre os volumes mobilizados e estocados no reservatório (BERGER, 2011)

Nº. DE CASOS	ALTURA BARRAG.	% MOBILIZADA		Ref.
		FAIXA	MÉDIA	
11	15m a 46m	14% a 100%	40%	(1)
16	20m a 61m	1% a 100%	29%	(2)
19	-	3% a 100%	28%	(3)
31	12m a 61m	1% a 100%	26%	(4)
28	5m a 66m	3% a 100%	33%	(5)
72	-	-	20%	(6)

(1) Lucia (1981); (2) USCOLD (1995); (3) Garga e Khan (1995); (4) tailings.info (2015); (5) Rico *et al.* (2008); (6) Azam e Li (2010).

2 METODOLOGIA

As dificuldades envolvidas no desenvolvimento de estudos de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos estão associadas em parte à incompreensão dos fenômenos geotécnicos desenvolvidos na ruptura.

De uma maneira geral, em rupturas de barragens de contenção de água, a geometria do reservatório pode ser bem representada através de uma curva cota vs volume, uma vez que a água apresenta resistência ao cisalhamento

insignificante à baixas taxas de cisalhamento e, em geral, toda a água reservada é expelida do reservatório no caso de uma ruptura. Na barragem de rejeitos, a representação da parcela do volume estocado no reservatório que é mobilizado está relacionada a aspectos dinâmicos de estabilidade geotécnica e erosão.

Segundo Savage *et al.* (2003), em depósitos de argilas sensíveis, conhecidas como “quick clays”, foi observado o desenvolvimento de rupturas por fluxo com movimentos de massa que atingiram velocidades de dezenas de metros por segundo. De acordo com os autores, uma vez que uma pequena ruptura se inicia, ocorre o desenvolvimento espontâneo do fenômeno da liquefação e o fluxo é acarretado. Consequentemente, a ruptura deixa os taludes sem suporte lateralmente, provocando uma série de escorregamento rotacionais ou translacionais e que rapidamente se estende para montante. O movimento total da ruptura é translacional e retrogressivo, uma vez que os rejeitos liquefeitos continuam a fluir e descalçar o talude. O fenômeno como um todo pode durar de alguns minutos a algumas horas.

Savage *et al.* (2003) explicam ainda que, após cessado o movimento, o aspecto da ruptura pode visualizado como na Figura 1 resultando em uma série de cicatrizes que se alongam paralelamente e transversalmente ao talude, tendo como restrição uma brecha mais estreita. A geometria da ruptura é popularmente conhecida como “bottle-neck”.

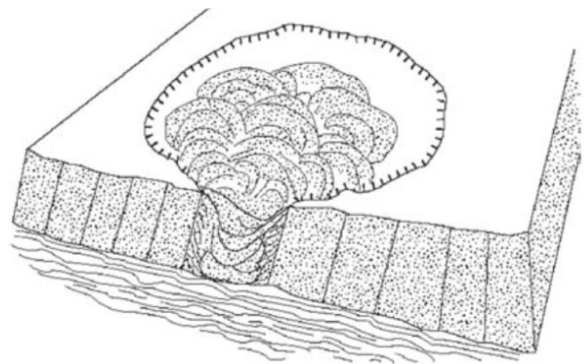


Figura 1 - Morfologia de ruptura regressiva (“bottle-neck”) formada em uma ruptura. (SAVAGE *et al.*, 2003)

As observações do desenvolvimento do fenômeno da ruptura em depósitos de argilas sensíveis realizadas por Savage *et al.* (2003) são também aplicáveis às rupturas de estruturas de

contenção de rejeitos, uma vez que, nesses depósitos, as rupturas também estão associadas ao desenvolvimento de processos de liquefação. A Figura 2 apresenta uma vista aérea da ruptura da barragem de Merriespruit, ocorrida em 1994, na África do Sul. É possível observar a morfologia da ruptura, se assemelhando à descrita por Savage *et al.* (2003).

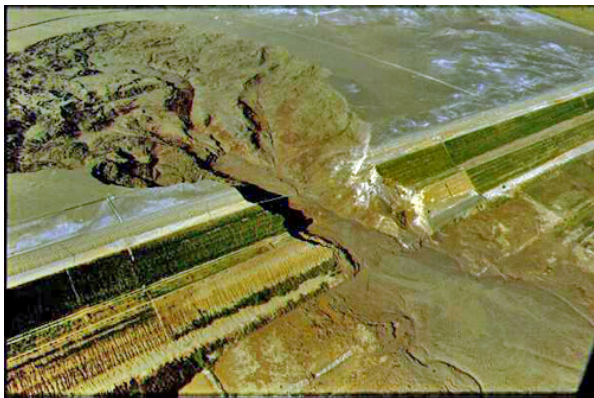


Figura 2 - Imagem aérea da ruptura da barragem de Merriespruit (TAILINGS.INFO, 2015)

O desenvolvimento da metodologia proposta procurou incorporar aspectos geotécnicos para fundamentar a compreensão do fenômeno. Por outro lado, foi verificado que existem diversos fatores externos ao problema, cuja determinação foge à capacidade de racionalização e equacionamento.

A geometria do reservatório, as condições topográficas à montante e o estado dos rejeitos no reservatório tem influência direta na maneira como se desenvolve a ruptura regressiva dentro do reservatório.

A partir da Figura 3 é possível observar como a relação entre a altura do maciço e o comprimento da superfície de ruptura dentro do reservatório têm influência na proporção entre o volume de rejeitos que são expelidos do reservatório e o volume de rejeitos estocado.

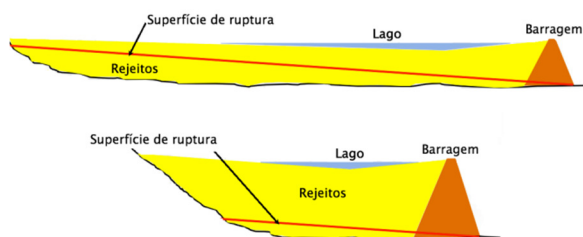


Figura 3 - Influência da geometria do reservatório na ruptura (adaptado de BERGER, 2011)

Blight (2010) propôs uma abordagem simples para estimar o volume envolvido na ruptura, assumindo a hipótese que a geometria em planta pode ser aproximada a uma elipse (Figura 4). A proposição de Blight (2010) pode ser sustentada pela observação das geometrias de dezenas de rupturas descritas em casos históricos, inclusive as reportadas por Olson (2001), onde é possível observar que a superfície pós-ruptura dos rejeitos pode ser bem aproximada por uma reta.

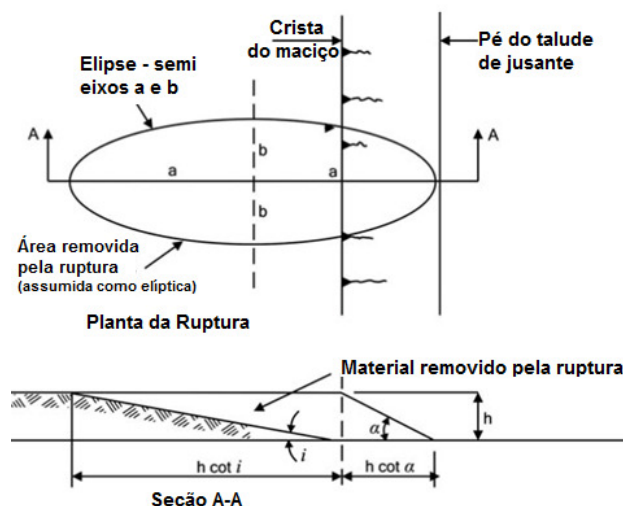


Figura 4 - Estimativa do volume de ruptura através da aproximação à elipse (adaptado de BLIGHT, 2010)

Através do cálculo do ângulo de estabilização dos rejeitos dentro do reservatório pode-se estimar o volume de ruptura pelas relações geométricas propostas por Blight (2010), que aproximam a geometria da ruptura em planta a uma elipse, conforme apresentado na Figura 4.

A área da ruptura (A) pode ser estimada através da Equação 1.

$$A = \pi \cdot a \cdot b \quad (1)$$

Em que “a” e “b” são eixos da elipse de ruptura.

O volume de ruptura pode ser estimado através da Equação 2.

$$Vr = \frac{A \cdot H}{2} \quad (2)$$

Em que “H” é a altura da barragem e “A” é a área da elipse de ruptura calculada pela Equação 1.

A partir da Figura 4 é possível observar que, após a estabilização do movimento, a superfície de rejeitos formada para montante do barramento rompido pode ser avaliada através do conhecimento da geometria do reservatório e do ângulo de estabilização do talude de rejeitos ($i_{estável}$).

Morgenstern (1948) construiu um ábaco para o cálculo do ângulo ($i_{estável}$) que se desenvolve no caso de uma ruptura em um maciço de argila normalmente adensada, assumindo a estabilização da ruptura no interior do reservatório quando a massa atinge F.S=1 para a resistência mobilizada disponível.

O ábaco desenvolvido por Morgenstern é aplicável aos rejeitos uma vez que o comportamento da massa disposta se aproxima do estado normalmente adensado, sendo a resistência ao cisalhamento não drenado dependente do estado de tensão efetivo existente na massa antes da ruptura. No caso de um carregamento não drenado em rejeitos granulares, após o desencadeamento do gatilho da liquefação, é inevitável que a resistência ao cisalhamento decaia até a resistência residual no estado permanente ou crítico, denominada por Olson (2001) como resistência liquefeita (Su_{LIQ}).

A Figura 5 apresenta o ábaco desenvolvido por Morgenstern para previsão do ângulo de estabilização da massa rompida no caso de materiais normalmente adensados em uma ruptura não drenada.

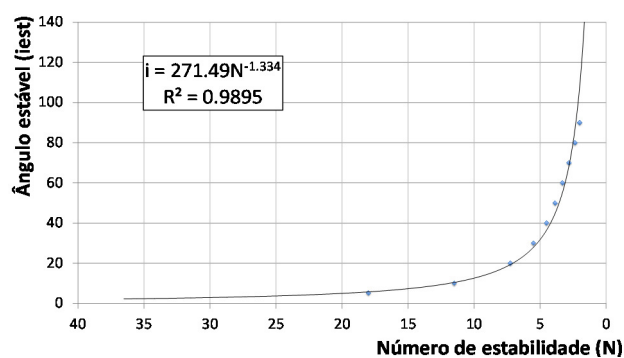


Figura 5 - Ajuste do realizado no ábaco de Morgenstern.

Para a utilização do ábaco da Figura 5 é necessário o cálculo do Número de estabilidade (N), dado pela Equação 3.

$$N = \frac{\gamma}{\bar{U} \cdot \gamma' \left(\frac{Su_{LIQ}}{\sigma'v} \right)} \quad (3)$$

em que:

- γ é o Peso específico do rejeito [kN/m^3];
- γ' é o Peso específico submerso dos rejeitos [kN/m^3];
- $\bar{U}$ é o Grau de adensamento médio dos rejeitos [%];
- $\frac{Su_{LIQ}}{\sigma'v}$ é a razão de resistência ao cisalhamento dos rejeitos liquefeitos.

O número de estabilidade reflete a competência dos materiais em estado residual em se manterem estáveis. É interessante observar, para a obtenção da razão de resistência ao cisalhamento dos rejeitos liquefeitos, Olson (2001) propôs correlações, à partir de ensaios de SPT e CPT. Como base de referência, as razões de resistência liquefeita calculadas por Olson (2001) situaram-se quase em sua totalidade, abaixo de 0,1.

O grau de adensamento médio dos rejeitos pode ser estimado através de uma análise de adensamento à grandes deformações ou obtido através de medições in situ de poropressão. Para a sistematização da metodologia foi realizado um ajuste no ábaco de Morgenstern, conforme apresentado na Figura 5.

Para melhor compreensão da sensibilidade dos resultados da solução de Morgenstern foi construído o Ábaco da Figura 6, em que foram calculados os ângulos estáveis em função da razão de resistência ao cisalhamento dos rejeitos liquefeitos para vários graus de adensamento diferentes.

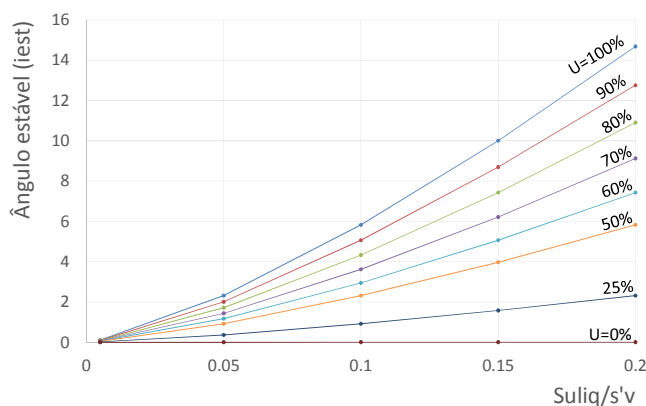


Figura 6 - Análise de sensibilidade do ábaco de Morgenstern.

A análise do ábaco da Figura 6 permite uma série de verificações sobre o ábaco de Morgenstern. É possível observar que, para grau de adensamento igual a zero o ângulo de repouso dos rejeitos é considerado nulo, tendo o material um comportamento fluido. Outra importante observação é a faixa de valores de ângulos possíveis para estabilização dos rejeitos pós-ruptura.

De acordo com Olson (2001) a grande maioria dos casos históricos de ruptura foram retroanalisados com razões de resistência ao cisalhamento liquefeita entre 0,05 e 0,1, ao se avaliar a faixa de ângulos i_{est} resultantes nesse intervalo obtem-se ângulos entre 1° e 6° , a depender do grau de adensamento dos rejeitos pré-ruptura.

Os ângulos possíveis obtidos na análise de sensibilidade estão de acordo com os ângulos reportados por diversos autores em casos históricos de rupturas (LUCIA, 1981; ICOLD, 2008; BLIGHT & FOURIE, 2003)

A Figura 4 permite observar que o parâmetro “a” da elipse é dependente da altura da barragem (H), do ângulo do talude da barragem (α) e do ângulo de estabilização dos rejeitos dentro do reservatório. A dificuldade da estimativa da largura da ruptura dentro do reservatório (parâmetro “b” da geometria da elipse de ruptura) motivou a avaliação da geometria das rupturas observadas em casos históricos.

A escassez de dados detalhados reportados na literatura fez com que apenas 10 casos históricos de ruptura pudessem ter a geometria dentro do reservatório avaliada. A Tabela 2 apresenta um resumo dos dados de geometria das rupturas avaliadas. A partir do resumo de dados apresentado identificou-se uma relação entre o comprimento e a largura da ruptura em planta.

Através da identificação da relação entre as duas grandezas foi construído o gráfico da Figura 7, que apresenta a melhor relação obtida entre a largura e o comprimento da ruptura, realizada na forma de potência.

Tabela 2 - Dados históricos de rupturas de barragens de rejeitos

Barragem	Tipo de rejeito	Altura da barragem [m]	Comp. da ruptura (a) [m]	Largura da ruptura (b) [m]
Mount Polley Canadá (2014)	Ouro	60,0	1300	750
Barragem B1, Brasil (2014)	Ferro	61,5	310	210
Kolontár, Hungria (2010)	Bauxita	22,0	270	160
Tapo Canyon, EUA (1994)	Agregado	24,0	140	105
Merriespruit África do Sul (1994)	Ouro	31,0	300	180
Saaiplaas - África do Sul (1993)	Ouro	28,0	230	140
Bafokeng, África do Sul (1974)	Platina	20,0	650	350
Mochikoshi No. 1, Japão (1978)	Ouro	28,0	150	106
Mochikoshi No. 2, Japão (1978)	Ouro	19,0	55	30
El Cobre Old Dam, Chile (1965)	Cobre	35,0	430	321

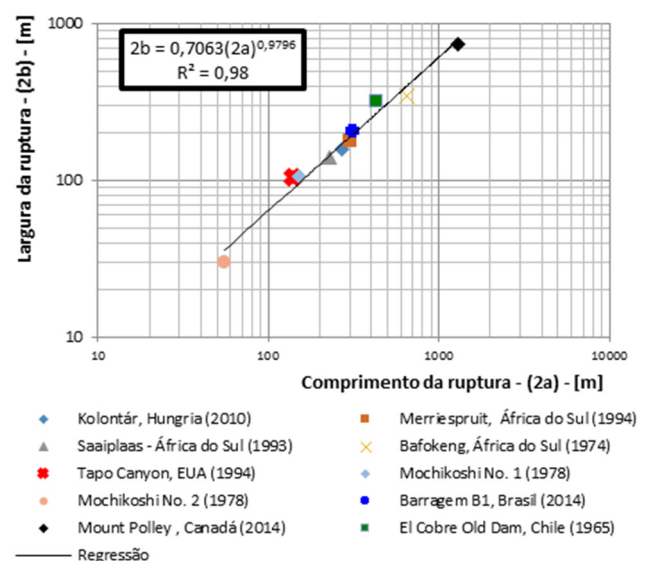


Figura 7 - Relação entre a largura e o comprimento da ruptura dentro do reservatório

Levando-se a Equação 1 à Equação 2 e lançando-se mão da regressão obtida no ábaco de Morgenstern obtém-se a relação apresentada na Equação 4.

$$V_f = 0,25 \cdot \pi \cdot b \cdot H^2 \cdot [\cot(271,49 N^{-1.334}) + \cot \alpha] \quad (4)$$

em que:

- b é a metade da largura da ruptura dentro do reservatório [m];
- H é a altura da barragem [m];
- N é o parâmetro de estabilidade, dado pela Equação 3.
- α é o ângulo do talude da estrutura antes da ruptura [°];

3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA PREVISÃO REALIZADA ATRAVÉS DA METODOLIGIA PROPOSTA

Com o intuito de avaliar a qualidade da previsão do volume mobilizado na ruptura foi elaborada a Tabela 3, em que se confrontam volumes calculados através da Equação 2 e volumes reais obtidos de casos históricos de ruptura reportados na literatura.

Tabela 3 – Comparação entre os volumes mobilizados na ruptura reais e estimados com base em casos históricos

Barragem	Volume real mobilizado na ruptura [m³]	Volume estimado mobilizado na ruptura [m³]
Mount Polley, Canadá (2014)	25.000.000,00	22.972.896,28
Kolontár, Hungria (2010)	900.000,00	373.221,21
Merriespruit, África do Sul (1994)	600.000,00	657.378,26
Saaiplaas - África do Sul (1993)	140.000,00	354.057,49
Bafokeng, África do Sul (1974)	3.000.000,00	1.786.780,82
Mochikoshi No. 1, Japão (1978)	80.000,00	87.414,82
Mochikoshi No. 2, Japão (1978)	3.000,00	6.479,53
El Cobre Old Dam, Chile (1965)	1.950.000,00	1.900.000,00

Através da Tabela 3 é possível observar que a equação apresentou boa previsão na maioria dos casos como Merriespruit, Mochikoshi, El Cobre e Mount Polley. Em outros casos como Kollontár e Bafokeng o volume estimado foi menor do que o volume reportado mobilizado na ruptura. Uma hipótese que poderia explicar essa diferença é que o volume de água no lago previamente a ruptura, que não é computado pela Equação 4, é em geral, contabilizado na quantificação do volume real total de material mobilizado.

A Figura 8 apresenta um gráfico contendo a relação entre os volumes de rejeitos mobilizados na ruptura e os volumes estocados no reservatório antes da ruptura para 50 casos históricos de rupturas em que se encontravam disponíveis os dados. Além dos dados históricos o gráfico a regressão proposta por Rico *et al.* (2008) e a reta bissetriz ($V_f=V_t$), considerada limite superior, representado os casos de barragens de água, em que todo o volume é expelido do reservatório. É possível observar que para os 50 casos históricos pesquisados há maior dispersão em relação à regressão de Rico *et al.* (2008) que trabalharam com 29 casos históricos.

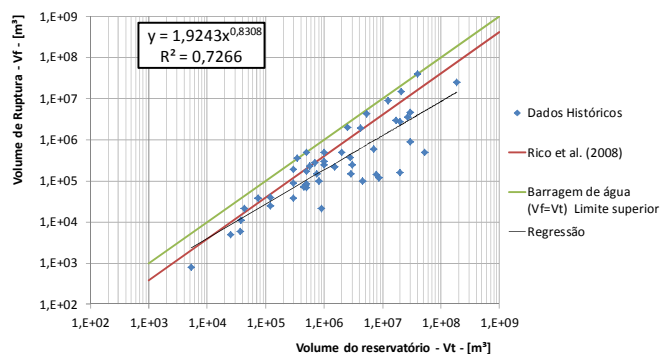


Figura 8 - Relação entre volume total estocado (V_t) e volume de ruptura (V_f). (RIBEIRO, 2015)

Apesar das relações estatísticas propostas por Rico *et al.* (2008) e Ribeiro (2015) apresentaram valores de r^2 razoáveis, através da Figura 8 é possível observar que, para alguns casos, o erro de previsão poderia chegar a até duas ordens de grandeza.

3 CONCLUSÕES

A determinação das características geométricas da ruptura regressiva dentro do reservatório foi fundamentada em conhecimentos bem consolidados da engenharia geotécnica, de modo que, a determinação do volume mobilizado no caso de uma ruptura possa ser realizada tendo como subsídios parâmetros geotécnicos e características operacionais das estruturas.

Através da avaliação da geomorfologia das rupturas de 10 (dez) casos históricos foi possível determinar uma boa relação entre os parâmetros elípticos assumidos para a forma da geometria em planta.

Com a metodologia proposta, foi possível avaliar os volumes de ruptura de estruturas de disposição de rejeitos com menores incertezas, evitando erros discrepantes de uma ordem de grandeza. Através da comparação de 8 (oito) casos a metodologia mostrou-se mais precisa se comparada às previsões estatísticas pelo método de Rico *et al.* (2008).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de mestrado em geotecnia e transportes do departamento ETG da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo incentivo à elaboração desse artigo.

REFERÊNCIAS

- AZAM, Shahid; LI, Qiren. (2010) Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50-54.
- BERGER (2011) Estimation of Tailings Dam Break Discharges Arvind Dalpatram. *Workshop on Dam Break Analysis Applied to Tailings Dams*. USSD. Disponível em <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Dalpatram2011.pdf>, acessado em 25 abril de 2011.
- BLIGHT G. (2010). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. Taylor & Francis Group, London, UK. 641p.
- BLIGHT G.E.; FOURIE A.B. (2003). *A Review of Catastrophic Flow Failures of Deposits of Mine Waste and Municipal Refuse*. University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa. 17p.
- GARGA, V.K. AND KHAN, M.A. (1995). *Review and Comparison of a deterministic Model for estimating Flow Out Distance of Breached Tailings*. Report

- submitted to Resources Canada, Mining Research Laboratory.
- ICOLD (2008). *Tailings dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learned from practical experiences*. Bulletin 121. 144 p. Jaouhara.
- LUCIA, P.C. (1981). *Review of experiences with flow failures of tailings dams and waste impoundments*. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, California.
- MORGENSTERN N. E GIBSON R. E. (1948). A note on the stability of cuttings in normally consolidated clays. *Geotéchnique*. p. 212-216.
- OLSON, S.M. (2001). *Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance*. Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana. 564 p.
- RICO, M., BENITO, G., SALGUEIRO, A.R., DíEZ-HERRERO, A. e PEREIRA, H.G. (2008). *Reported tailings dam failures*. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials. Science Direct*. Elsevier. 846-852 pp.
- RIBEIRO, V.Q.F (2015). *Proposta de Metodologia de Avaliação do Efeito de Rupturas de Estruturas de Contenção de Rejeitos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia. Belo Horizonte. 291p.
- SAVAGE R. L. B W Z.; WASOWSKI J. (2003). *Mechanics of Earth Flows*. 8p.
- TAILINGS.INFO (2015). *Acidentes e Falhas ocorridos com rejeitos*. Disponível em www.tailings.info/accidents.htm. Acessado em 15 de janeiro de 2015.
- USCOLD (1995). *Tailings Dam Incidents*. Denver, Colorado.