

MÉTODO DE LEVANTAMENTO DE TRANSFERÊNCIA DE MATERIAL ROMPIDO ATRAVÉS DE MODELO FÍSICO DE BARRAGEM - APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO A LASER

River Surface Survey Method in Physical Reduced Model through Photogrammetry - Application of the Laser Ray Triangulation Technique in Evaluation of Mass Transfer After Rupture

Tennison Freire de Souza Júnior¹, Álvaro Muriel Lima Machado², Jorge A. Silva Centeno², Cristhyano Cavali da Luz¹ & Sidnei Helder Cardoso Teixeira¹

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil – PPGECC

Depto. de Construção Civil – Jardim das Américas – Centro Politécnico – Curitiba – Brasil – CEP 81.531-990
{tennisonufpr, sidnteix}@outlook.com; criscluz@hotmail.com

² Universidade Federal do Paraná – UFPR

Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas – PPGCG

Depto. de Geomática – Jardim das Américas – Centro Politécnico – Curitiba – Brasil – CEP 81.531-990
{alvaroml, centeno}@ufpr.br

Recebido em 22 de Agosto, 2017/ Aceito em 24 de Setembro, 2017

Received on August 22, 2017/ Accepted on September 24, 2017

RESUMO

Este trabalho tem como proposta apresentar um método de quantificação de volume de resíduos mineral transferido do trecho montante para o trecho jusante de uma barragem de contenção de rejeitos com uso de técnica de triangulação a laser. Rupturas de barragens de rejeitos são fenômenos que podem causar uma variedade de danos catastróficos, com impactos ambientais, sociais ou econômicos. De forma a observar o comportamento da ruptura, alternativas baseadas em modelos reduzidos podem ser representativas uma vez resguardadas questões referentes a teoria da semelhança entre o protótipo e modelo reduzido. Para isto, neste trabalho foi desenvolvido um método a partir de um modelo físico que simula a praia de rejeitos deste tipo de estrutura, que antes e após a ruptura por uma brecha fictícia, formaria uma superfície a partir de nuvens de pontos identificadas através da técnica de triangulação a *laser*, georreferenciadas por meio de programação em *software* MATLAB® e modeladas através de *software* SURFER 3D®. A diferença volumétrica apresentada em diferentes momentos possibilita avaliar o quanto de material foi transferido. Observou-se, em meio às simulações, que este método pode representar o relevo formado após ruptura com um nível de precisão de 2mm, com tecnologia acessível e processamento de dados em tempo reduzido. Desta forma, este método de levantamento pode vir a auxiliar em avaliações estáticas e dinâmicas de modelos físicos com o viés de representar fenômenos naturais em escala real.

Palavras-chave: Triangulação a *Laser*, Ruptura de Barragens, Levantamento de Superfícies.

ABSTRACT

This work aims to announce a method of quantification of volume of mineral waste transferred from the amount of retention dam of tailings with the use of laser triangulation technique. Tailings dams are phenomena that can cause a variety of catastrophic damage, with environmental, social or economic impacts. In order to observe the behavior of the rupture, alternatives based on reduced models may be representative once the questions regarding the similitude theory between the prototype and reduced model are safeguarded. For this, in the work, a method was developed from a physical model that simulates a beach of tailings of this type of structure, that before and after a rupture by a fictitious breach, forming a surface from clouds of points that were identified through the laser triangulation technique, georeferenced through programming in MATLAB® software and models via SURFER 3D® software. The volumetric difference presented in different moments made possible to evaluate the amount of material transferred. It was observed, through the simulations, that this method can represent the relief formed after rupture with a level of 2mm precision, with accessible technology and data processing in reduced time. In this way, this method of surveying may come to assist in static and dynamic evaluations of physical models with the bias of representing natural phenomena in real scale.

Keywords: Laser Triangulation, Dam Rupture, Surface Survey.

1. INTRODUÇÃO

Barragens de contenção de rejeitos representam estruturas semelhantes às barragens de terra, mas com a finalidade de estocagem de resíduos minerais oriundos do beneficiamento, a partir da deposição deste material em lagoas de estocagem (GERSCOVICH, 2012).

Os materiais constituintes destas estruturas, ao longo do processo de beneficiamento, apresentam variabilidade quanto ao comportamento geomecânico, o que interfere intrinsecamente no entendimento do material quando aplicado na construção dos aterros (RIBEIRO, 2015).

De acordo com um estudo da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2001), ao inventariar 18.401 locais de mineração, estimou-se em 1,2% a taxa de falha de barragens de rejeito ao longo de cem anos, superando a taxa de falha de 0,01% em barragens convencionais de retenção de água.

Depois de variados eventos de rompimento de barragens em território brasileiro (ALVES, 2015; BRASIL, 2015), estudos de ruptura hipotética vêm sendo realizados, em atendimento à legislação vigente (Lei Federal nº 12.334/2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens), com o intuito de delinear previsões a respeito do comportamento do material que a constitui. De maneira análoga, inúmeras rotinas computacionais auxiliam na avaliação do efeito da ruptura de barragens de reservação de água e da transferência de massa pós-evento, tais como o modelo *DAMBRK* (COLLISCHON e TUCCI,

1997) e o modelo *HEC-RAS* (XIONG, 2011; SUN *et al.*, 2017).

Segundo Ferreira e Andrzejewski (2015), os métodos de análise da ruptura hipotética são resumidos em equações empíricas e em modelos analíticos. Estes fundamentam-se nas equações de continuidade, da conservação da quantidade de movimento e em diversas relações entre propriedades físicas associadas ao escoamento, sedimento, geometria e materiais da barragem, ou seja, em uma abordagem hidrodinâmica, sendo eles: Froehlich (1995); Von Thun e Gillete (1990); Hagen (1982); McDonald e Langridge-Monopolis (1984); Bureau of Reclamation (1988); Critério da Eletrobrás; Kirkpatrick (1977) e Soil Conservation Service (1981). Porém, quando aplicados esses diferentes métodos para o mesmo estudo de caso, podem-se observar diferenças significativas entre os resultados obtidos.

Os mesmos autores citaram que os resultados apresentados pelo modelo analítico nos valores de vazão de pico, para os casos de *piping* e galgamento, e o tempo de formação da brecha no caso do galgamento, foram superiores em comparação às fórmulas empíricas. Além disso, o pico de vazão defluente estimado no método analítico, para o caso do *piping*, foi superior em 40% ao maior valor estimado pelas fórmulas empíricas; e para o caso de galgamento foi 240% maior que o valor. Por fim, o tempo de formação da brecha, para o caso do galgamento, se apresentou 7,7 vezes em relação ao maior valor estimado pelas fórmulas empíricas.

O presente estudo tem como objetivo a apresentação de um método de avaliação quantitativa de transferência de material residual de barragens de contenção de rejeitos após um evento de ruptura. A técnica utilizada foi a de triangulação a *laser* aplicada em um modelo reduzido. Esta pesquisa possibilitou, a partir de parâmetros geotécnicos, geométricos, entre outros, estabelecer uma relação destes com a liberação do material em estágio de ruptura.

2. TEORIA DA SIMILITUDE

O fator de escala entre o protótipo e o modelo reduzido é regido por dois tipos de similitudes, que são: geométrica e cinemática. A similitude geométrica busca estabelecer uma equivalência de comportamento a partir das relações de dimensões do protótipo com o modelo reduzido. Já a similitude cinemática aborda o conceito da equivalência de comportamento aplicado à relação entre a aceleração do modelo real (protótipo) e uma aceleração imposta ao modelo reduzido (DELL'AVANZI *et al.*, 2006).

Conforme Dell'Avanzi *et al.* (2006), a similitude geométrica (λ) é obtida pela proporção escalar entre as dimensões do protótipo (L_p) e as dimensões do modelo reduzido (L_m), através da equação (1), a saber:

$$\lambda = \frac{L_p}{L_m} \quad (1)$$

Onde:

L_p : Comprimento do protótipo;

L_m : Comprimento do modelo.

Quanto às questões cinemáticas, segundo Silva (2013), são as relações entre campos de aceleração e velocidade aos quais o protótipo e o modelo estão submetidos. No caso do experimento em questão, as acelerações obedecem a um fator de escala unitário (N), através da equação (2):

$$N = \frac{a_p}{a_m} \quad (2)$$

Onde:

a_p : Aceleração do protótipo;

a_m : Aceleração do modelo.

Quando os modelos reduzidos são submetidos às avaliações simulatórias não centrifugadas, o material ou equipamento possui fator de escala semelhante ao relacionado na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre a grandeza e parâmetros versus fator de escala (protótipo/modelo reduzido)

Grandeza	Fator de Escala (Protótipo/Modelo reduzido)
Aceleração	1
Comprimento	λ
Área	λ^2
Volume	λ^3
Força	λ^3
Densidade	1
Massa	λ^3
Peso específico	1
Tensão	λ
Ângulo de atrito	1
Porosidade	1
Módulo de elasticidade	λ
Intercepto coesivo	λ
Inércia	λ^4

Fonte: Silva (2013).

3. AVALIAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA ATRAVÉS DE MODELO FÍSICO

A avaliação de transferência de massa de rejeitos considera a diferença entre estágios de ruptura, pré e pós, sendo avaliado matematicamente pela equação (3):

$$V_t = V_{pré} - V_{pós} \quad (3)$$

Onde:

V_t : Volume transferido;

$V_{pré}$: Volume inicial, pré-ruptura;

$V_{pós}$: Volume final, pós-ruptura.

Dadas as questões dinâmicas do fenômeno, o volume transferido pode ser avaliado em diferentes faixas temporais, obedecendo a um determinado fator de escala do modelo reduzido versus modelo protótipo.

4. TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO À LASER

Para medição da variação do volume no modelo reduzido foi utilizada a técnica de triangulação a *laser*. Na triangulação a *laser*, um raio *laser* é projetado sobre um objeto e seu reflexo

é capturado por uma câmera. O percurso do laser desde o emissor, passando pelo objeto e o ponto de incidência no CCD da câmera, forma um triângulo cuja base e dois ângulos podem ser medidos, o que permite calcular a distância entre a câmera e o objeto (Figura 1) (MALHOTRA *et al.*, 2011).

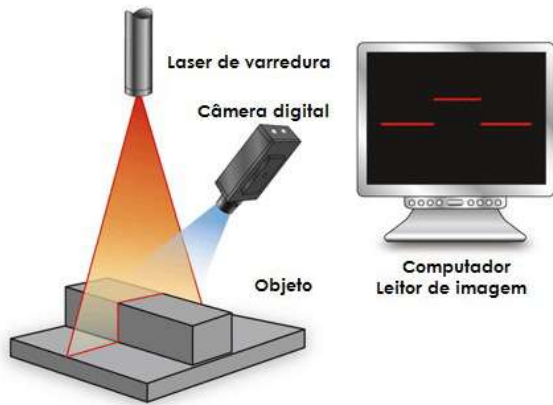


Fig. 1 - Ilustração da técnica de triangulação à laser. Fonte: Adaptado de Stemmer Imaging (2017).

Para o cálculo da distância, conforme a Figura 2, podem ser considerados constantes e são medidos: a base, ou distância (a) entre o emissor *laser* e a câmera e a distância focal da câmera (f). O ângulo (b) entre o eixo do *laser* e o eixo óptico da câmera e a distância (h) devem ser calculados. Esta coordenada (h) é calculada com base nas coordenadas do ponto principal da câmera, o tamanho do pixel e a linha onde se forma a imagem do *laser* na imagem.

Então a distância entre o objeto e a câmera pode ser calculada com as equações (4) a (7), a saber:

sendo:

$$\tan b = \frac{a}{D} \quad (4)$$

$$\tan b = \frac{h}{f} \quad (5)$$

então:

$$\frac{h}{f} = \frac{a}{D} \quad (6)$$

$$D = \frac{(a.f)}{h} \quad (7)$$

A nuvem de pontos é adquirida armazenando cada valor calculado da distância (D) entre o *laser* e o objeto. Calculando-se o valor de D , pode-se obter o ângulo (b) entre o eixo do *laser* e o raio refletido. Assim, quando todos os pontos no objeto são digitalizados, gera-se a superfície como imagem, conforme Figura 2 (MALHOTRA *et al.*, 2011).

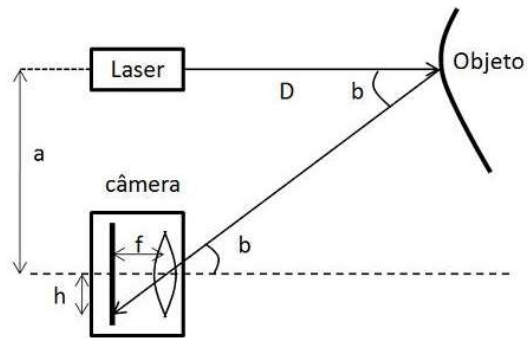


Fig. 2 - Aquisição da nuvem de pontos por triangulação à *laser*. Fonte: Adaptado de Malhotra *et al.* (2011).

Usando um emissor *laser* de linha uma linha da superfície pode ser medida com esta técnica. Para se obter uma descrição da superfície do objeto, o sistema de triangulação é deslocado no plano horizontal acima da superfície, fazendo a varredura de linhas paralelas da superfície do objeto. Desta forma, obtém-se os dados com as variações de cotas altimétricas a cada seção transversal, pela tortuosidade (formatos curvos) ou pela interrupção de linhas (formatos retilíneos) da imagem da seção, conforme Figura 1 (MALHOTRA *et al.*, 2011).

As coordenadas dos pontos que formam a nuvem são calculadas através das equações (8) a (10), sendo:

$$Y = Dh \quad (8)$$

$$X = \rho_{\frac{\text{pixel}}{\text{cm}}} \quad (9)$$

$$Z = f(L, C) \quad (10)$$

onde:

dh : Distância horizontal, obtida diretamente pela placa deslizante no sentido de maior dimensão da caixa simulatória (a partir da distância inclinada e do ângulo zenital), em centímetros;

$\rho_{\frac{pixel}{cm}}$: Densidade de pixels, ou seja, *pixels* por centímetro para diferentes cotas altimétricas, em pixels/cm;

$f(L, C)$: Coordenadas em 2D dos *pixels* em função das linhas e colunas da imagem, em centímetros.

5. MATERIAIS

Os equipamentos (Figura 3) que constituem o modelo físico proposto para a leitura do relevo pós ruptura é constituído de:

- (a) Caixa simulatória e brecha acopladas;
- (b) Estrutura metálica de suporte de base de leitura com pranchas fixas e móveis;
- (c) *Webcam* com resolução de imagem de 640 x 480 *pixels*;
- (d) Emissor *laser* linear.
- (e) Computador com o sistema operacional *Windows 7® 32 bits*, processador *Intel® Core Duo E7400 2.80GHZ*, Memória (*RAM*) de 2.00GB com *software My Cam*

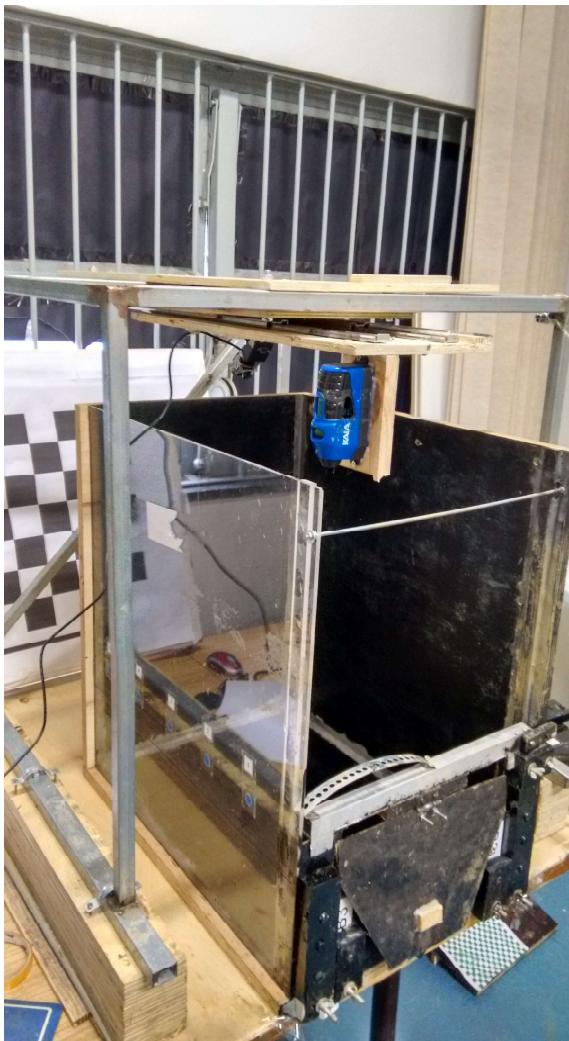
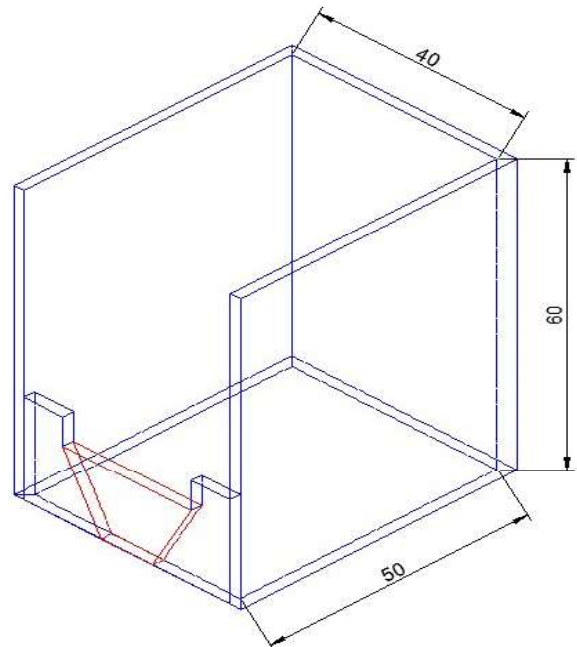


Fig. 3 - Modelo em escala reduzida do trecho montante de uma barragem de rejeitos.

As dimensões e geometria da caixa simulatória estão detalhadas na Figura 4 e Figura 5. As paredes e a portinhola foram revestidas com duas a três camadas (demãos cruzadas) de impermeabilizante de tinta asfáltica impermeável Neutrol®, com o intuito de impedir perdas de umidade da bentonita através do processo de absorção.



PERSPECTIVA ISOMÉTRICA
ESC: 1/100

Fig. 4 - Detalhamento da geometria da caixa simulatória (cotas em cm) – Perspectiva isométrica na escala 1:100.

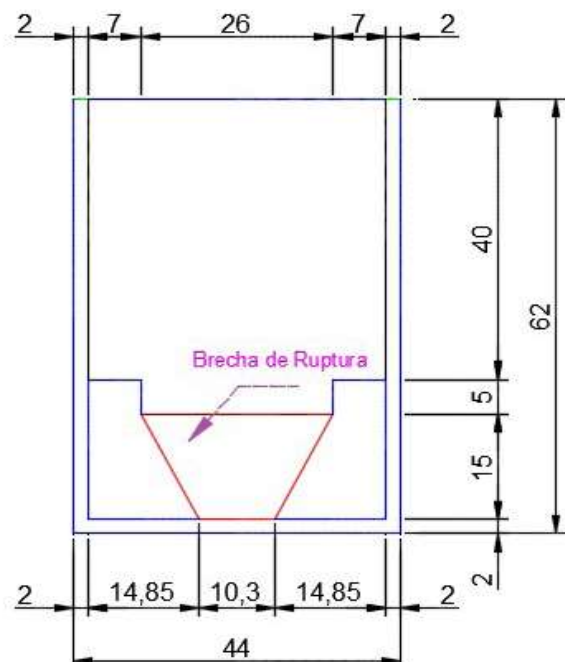


Fig. 5: Detalhamento da geometria da caixa simulatória (cotas em cm) – Vista frontal na escala 1:100

Foi aplicado um rejunte acrílico nas aberturas existentes entre conexões de painéis, de modo a prevenir fuga de material e/ou a passagem de água pelas mesmas. Esses procedimentos foram desenvolvidos para que se preservasse a umidade do material, através da estanqueidade do meio ao qual foi depositado, a fim de se obter uma maior precisão dos resultados.

A dimensão da brecha se baseiam em Brunner (2014). O mesmo cita para estimativa de brecha os estudos de MacDonald e Langridge (1984), onde a brecha obedece a um formato trapezoidal com declividades laterais de 0,5H:1V, e de Froelich (2008) cita que a declividade lateral para rupturas características de *piping* é de 0,7H:1V. Maiores detalhes de projetos de barragem de rejeitos podem ser observados em Soares (2010).

6. MÉTODOS

Para a determinação do volume de rejeitos transferido do trecho montante para o trecho jusante de uma barragem de contenção de rejeitos, com uso da técnica de modelo em escala reduzida, foi estabelecido o fluxograma de atividades demonstrado na Figura 6.

As leituras foram realizadas através do endereçamento da coloração vermelha da

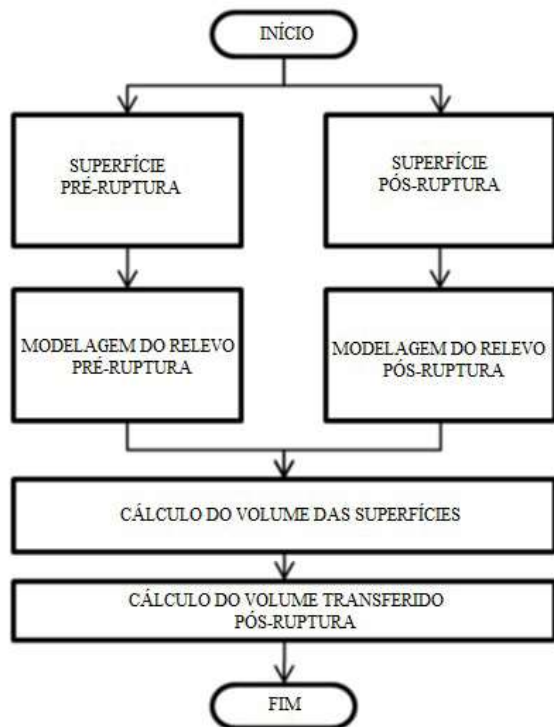


Fig. 6 - Fluxograma do método proposto.

figura, limitando os trechos referentes às leituras residuais. A modelagem da superfície tomando como RN (referência de nível) a cota da base da caixa simulatória, permite a estimativa volumétrica do modelo, cujo volume transferido foi estimado pela diferença entre as situações de pré e pós-ruptura, baseado na equação (3).

6.1 Calibração do sensor

Para se realizar as medidas, foi necessário realizar a calibração do sistema de varredura por triangulação. Para isto, utilizou-se um plano inclinado com padrão xadrez na superfície. Foram confeccionadas duas bases para medição das leituras, sendo uma elevada e plana na cota máxima (15 cm) e a outra uma rampa, variando de 2 cm a 15 cm. Desta forma, com uso de um papel xadrez em escala 1:100, foram realizadas três análises, a saber:

- Na cota 0 cm, aplicado diretamente na base (Figura 7);
- Na cota 15cm, em base elevada e plana (Figura 8);
- Aplicado na rampa, em alinhamento às bordas da caixa (Figura 9).

Nesta etapa devem-se identificar os trechos onde há reflexão de luz oriunda do *laser* na imagem obtida, conforme indicado na Figura 9. Quando há presença de substratos reflexivos ao entorno do modelo, como por exemplo, nas placas acrílicas, a luz emitida pelo *laser* linear é refletida, criando imagens virtuais cujos *pixels* geram leituras residuais, produzindo interferências no modelo.



Fig. 7 - Calibração em papel xadrez na cota 0 cm.

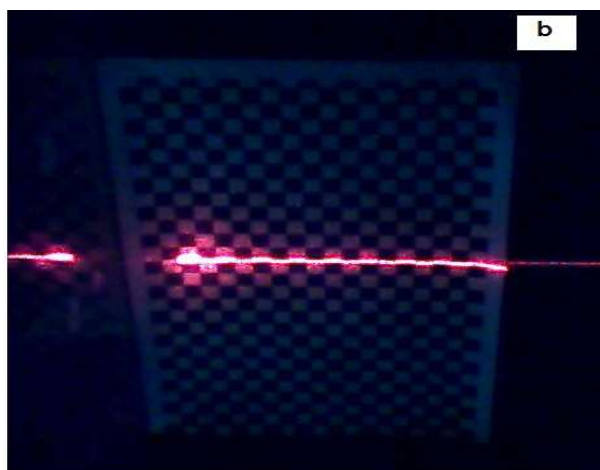


Fig. 8 - Calibração em papel xadrez na cota 15 cm.

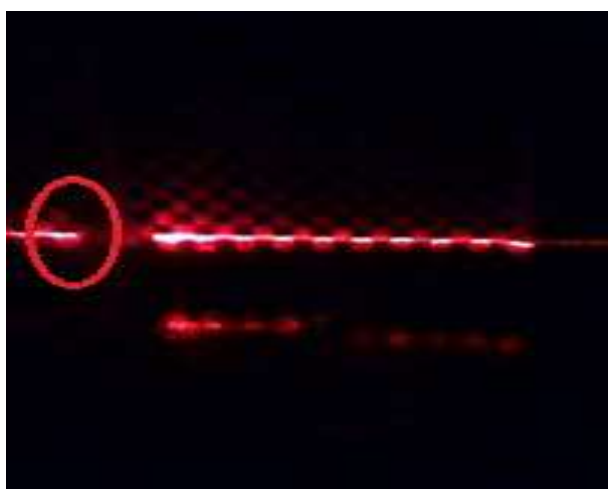


Fig. 9 - Calibração em papel xadrez na rampa (cota variável).

Sendo assim, a rotina computacional programada deve restringir as colunas ou as linhas de pixels para o espaço referente a superfície a ser lida.

6.2 Geração do modelo de superfície e quantificação da transferência de massa

Inicialmente, antes e após a simulação de ruptura da barragem no modelo físico, a tonalidade avermelhada do feixe de *laser* registrado nas fotografias foram descompostos em uma série de linhas e colunas de *pixels* para cada distância medida gerada no sentido Y. No experimento, as fotografias foram retiradas de forma equidistante (Δy) até atingir um determinado Y_{final} , conforme o sentido de deslocamento da prancha deslizante em relação a fixa.

Para o processamento da imagem e

transformação das coordenadas (linhas e colunas dos *pixels* do *laser*) em coordenadas tridimensionais XYZ utilizou-se uma rotina computacional em *MATLAB*®.

Posteriormente, todas fotografias até o Y_{final} foram agrupadas e processadas para a geração do modelo 3D e da superfície de contorno (curvas de nível) dos eventos, pré e pós ruptura, utilizando o software *SURFER 3D*®. Através deste software, o conjunto de pontos, também denominado nuvem de pontos, permite a modelagem da superfície por meio de técnicas de interpolação, no caso em específico pelo método de krigagem.

Por fim, a grade de diferença entre os dois modelos foi, também, calculada. Com a grade de diferença, foi possível calcular a transferência de massa. Para isto foram usados três métodos de cálculo de volume do software *SURFER 3D*®: regra do trapézio, regra de Simpson e regra de Simpson 3/8.

7. EXPERIMENTOS

Para avaliação do método proposto foi realizada uma simulação utilizando o material bentonita, com os parâmetros geotécnicos anunciados na Tabela 2 e curva de distribuição granulométrica apresentada na Figura 10.

Tabela 2: Parâmetros geotécnicos da bentonita utilizada

Parâmetros	Unid.	Valores
Densidade real dos grãos	g/cm ³	2,40
Umidade higroscópica	%	13,96
Massa unitária	g/cm ³	0,86
Limite de liquidez	%	455,94
Limite de plasticidade	%	65,28
Índice de plasticidade	%	390,66

O fator de escala calculado, adotando um protótipo de barragem de rejeitos fictício, foi de 1:500. Além disso, a brecha considerada possui uma geometria trapezoidal com as seguintes dimensões: altura de 15 cm; largura de fundo de 10,30 cm, largura de topo de 26,0 cm, declividade lateral de 0,52 cm e largura média de 18,15 cm.

Através do ensaio da Caixa L em laboratório, utilizando o método dos taludes infinitos para interpretação, foi estabelecida uma relação entre a resistência não-drenada do material (S_u) em função da variação de umidade da bentonita. Com isso, chegou-se a uma curva logarítmica ilustrada na Figura 11.

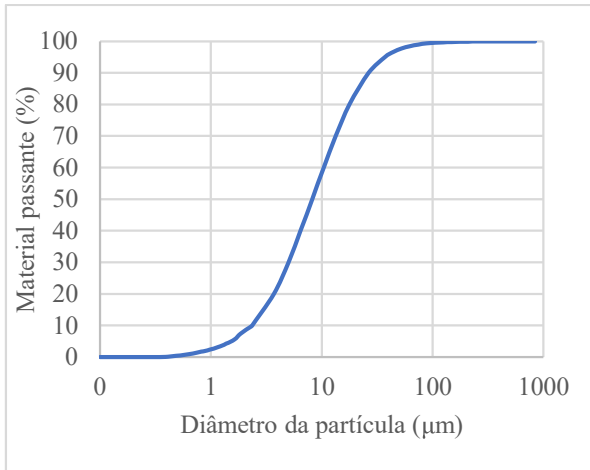


Fig. 10 - Curva granulométrica da bentonita.

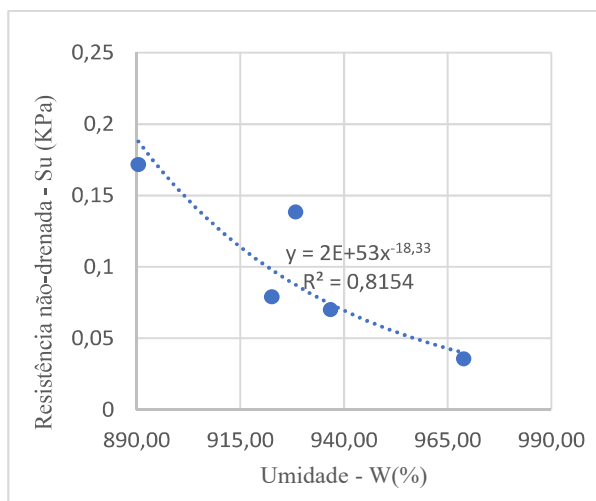


Fig. 11 - Avaliação da resistência não drenada (S_u) em função da variação da umidade do material (W).

Após a homogeneização do material a uma umidade referente a 969,94%, cujo S_u é igual 0,036 KPa, a caixa simulatória foi completamente preenchida até a cota de 15 cm \pm 1 cm.

Posteriormente, foram realizadas leituras de superfícies, através da tomada de fotografias (Figura 12 e Figura 13), da caixa simulatória preenchida até uma distância $Y=20$ cm da referência da brecha.

Feitas as leituras pré-ruptura, a brecha

foi aberta por um período de 3 segundos, o que representaria o tempo de formação da brecha obedecendo o fator de escala, e depois verificou-se a transferência do material em 20 minutos após a formação da mesma. Na sequência, a cunha formada foi fotografada até a distância $Y=20$ cm da referência da brecha.

8. RESULTADOS

A Figura 12 e Figura 13 mostram dois exemplos de imagens registradas durante o processo de varredura. Na primeira (Figura 12) nota-se uma curvatura na imagem do laser. Esta curvatura se deve à diferença de altura da superfície. Já na Figura 13, a superfície é quase plana, por isso a linha vermelha aparece como uma linha quase horizontal.



Fig. 12 - Fotografia pós-ruptura, em $Y=1$ cm.



Fig. 13 - Fotografia pós-ruptura, em $Y=20$ cm.

A Figura 14 mostra um exemplo do modelo tridimensional da superfície antes da ruptura. A superfície não é regular, mas é aproximadamente horizontal.

Já a Figura 15 mostra o mesmo material após a ruptura. Nota-se uma subsidência bem clara no lado direito da imagem.

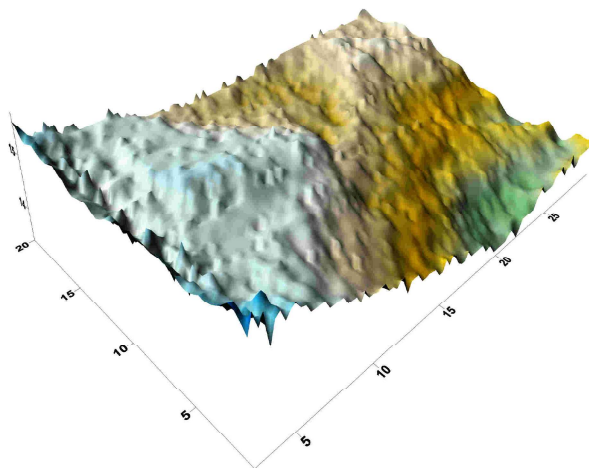


Fig. 14 - Mapas de superfícies tridimensionais pré-ruptura.

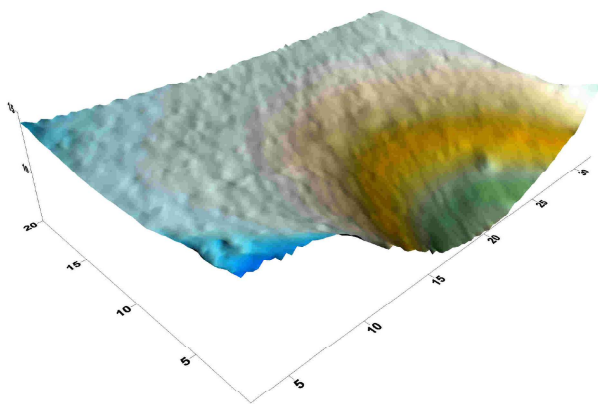


Fig. 15 - Mapas de superfícies tridimensionais pós-ruptura.

Na Figura 16 apresenta-se um exemplo das curvas de nível calculadas para o modelo pós-ruptura.

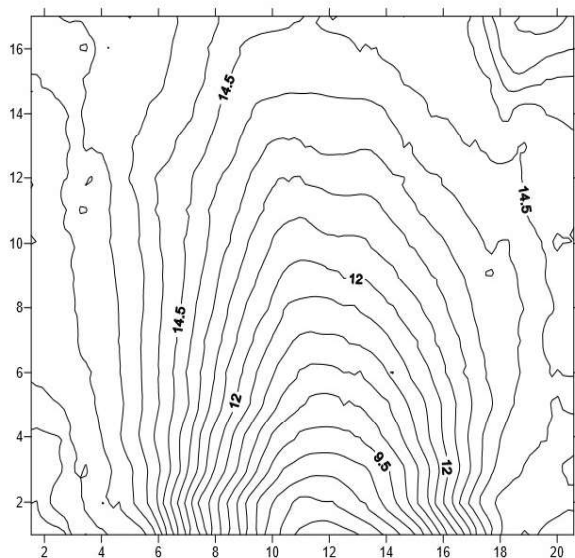


Fig. 16 - Mapas de contorno (curvas de nível).

Calculou-se a diferença de cota entre as duas grades, pré e pós ruptura. Com esta diferença, o volume transferido foi estimado. O volume médio transferido após ruptura da barragem em modelo reduzido foi de 1,348 litros de material, conforme os valores informados na Tabela 3.

Tabela 3: Cálculo de volume de transferido de material pós-ruptura

Método	Pré-ruptura (cm ³)	Pós-ruptura (cm ³)	Volume transferido (cm ³)
Regra do trapézio	7572,754	6223,924	1348,830
Regra de Simpson	7572,828	6223,767	1348,061
Regra de Simpson 3/8	7572,774	6223,861	1348,913
Média	7572,785	6223,851	1348,935

Com intuito de avaliar a eficiência do método foram medidos o tempo de processamento dos dados no software MATLAB®, no software SURFER 3D® e a quantidade de pontos gerados após o processamento das imagens e informados na Tab. 4.

Tabela 4: Avaliação de eficiência temporal de processamento dados e quantificação de pontos levantados

Momento	MATLAB® tempo (s)	SURFER 3D® Tempo (s)	Quantidade de pontos (unid.)
Antes de romper	2,13	3,59	7518
Depois de romper	2,04s	3,43	7508

8.1 Possíveis interferências do modelo físico

Após a realização do experimento, durante a leitura e processamento dos dados, verificou-se a possibilidade da existência de imprecisões oriundas das propriedades do material, da geometria da caixa simulatória e de leituras residuais, conforme demonstrado durante a calibração do modelo (item 6.1).

Alterada a questão da homogeneização da massa de material residual é possível que exista variação comportamental do material em fase de rompimento, conforme Figura 17. A plena

saturação do material, em definidas faixas de umedecimento, exige um determinado nível de energia e de tempos.

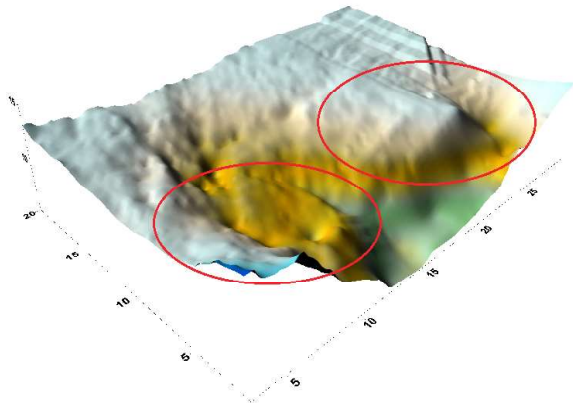


Fig. 17 - Formação de aglomerados de material residual.

É comum, experimentalmente, se obter formações de aglomerados de grãos densificados com um gradiente de umidade diferente do meio ao qual o material se encontra. Estes aglomerados podem alterar a forma e dinâmica da transferência de massa através da obstrução da cunha e da diferença dos parâmetros geotécnicos diferenciados (peso específico e resistência não drenada).

Conforme demonstrado na Figura 18, é importante preservar questões referentes à teoria da similitude (modelo reduzido versus modelo protótipo), de modo que a formação da cunha de ruptura obedeça a uma restrição geométrica da caixa simulatória.

Nesse caso, é possível estabelecer este controle a partir da faixa de umidade adotada, uma vez que a mesma tem correspondência com a resistência não drenada (S_u) do material no espalhamento.

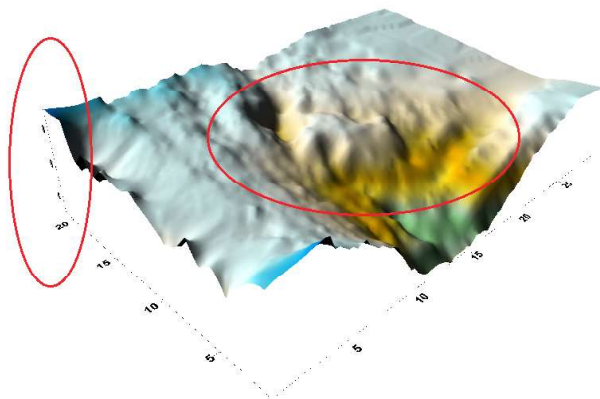


Fig. 18 - Transferência excessiva de material residual na ruptura extrapolando os limites geométricos da caixa simulatória.

Por fim, atentar-se aos erros ocasionados pelo fenômeno da paralaxe das medidas realizadas nas réguas durante o sequenciamento das fotografias. Uma forma minimizar este erro é utilizar indicativos pontiagudos como referência de leitura de medição ou acoplamento de um motor devidamente calibrado para deslocamento equidistante da rampa deslizante.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do método proposto no presente trabalho, foi possível estabelecer as seguintes considerações:

- É possível desenvolver a modelagem de superfícies acidentadas de ruptura de barragens em modelos físicos com um nível de precisão aceitável (± 2 mm), a partir da integração das simulações do modelo com georreferenciamento e mapeamento dos softwares MATLAB® e o SURFER 3D®, respectivamente;
- Foram utilizadas tecnologias de baixo custo para a interpretação e modelagem da superfície acidentada, através do modelo reduzido, tornando o método aceitável pra futuros estudos na mesma vertente;
- A simplicidade, aliada à rapidez do processamento das imagens, em um micro-computador com configurações comerciais torna o método eficiente, conforme Tab.4;
- A calibração consiste em uma etapa essencial para que o modelo realize a correspondência entre as leituras do imageamento fotográfico e as dimensões obtidas no modelo reduzido;
- É importante que todos os componentes do equipamento estejam rígidos durante o registro fotográfico, ou seja, a caixa simulatória e a estrutura metálica de suporte dos leitores (webcam e o laser) devem permanecer indeslocáveis, uma vez que a translação de algum destes componentes pode vir a descalibrar o equipamento e consequentemente interferir na interpretação dos dados;
- É de fundamental importância atentar-se à substratos reflexivos localizados em torno da superfície que será submetida ao registro fotográfico, uma vez que os mesmos podem incorporar leituras virtuais ao modelo tridimensional e afetar a quantificação do volume transferido, conforme descrito no

item 6.1;

- No método de triangulação à laser, basicamente, seis elementos devem ser fixos para a obtenção da precisão desejável, sendo eles: distância focal da câmera, distância de base (câmera versus laser linear); inclinação da câmera em relação a base de apoio; altura da câmera, altura do laser linear; e, por fim, a inclinação do laser linear.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (PPGECC-UFPR), pela oportunidade ofertada de divulgação de trabalhos científicos, ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) pelo financiamento das pesquisas do programa e o Departamento de Geomática da UFPR pelo fornecimento da infraestrutura espacial e tecnológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, H. R. **O rompimento de barragens no Brasil e no mundo: desastres mistos ou tecnológicos?** Faculdade Dom Helder Câmara, Belo Horizonte. 2015. 5 f. Disponível em: http://www.domhelder.edu.br/uploads//artigo_HRA.pdf.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings Dam Failures: A Review of the: Last One Hundred Years. **Waste Geotechnics**, s / v, s / n, p.50-53, Dec.2010.

BRASIL. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais.** 38 f. In: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Minas Gerais, 2015. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf. Acesso em: 14 de ago. 2017.

BRUNNER, G. **Using HEC RAS for Dam Break Studies.** Davis: USACE, 2014. COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** Volume 2. n.2. Jul/Dez 1997, 191-206.

DELL'AVANZI, E; H. GODOY, G.P;

BERNARDES, e H. JARROUGE. **Estudo do comportamento de estruturas grampeadas utilizando modelos reduzidos - conceitos teóricos para garantia da similitude modelo-protótipo.** 6 f. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, 2006.

FERREIRA, A. L. M; ANDRZEJEWSKI, E. A. **Comparação de métodos de cálculo da ruptura de uma barragem hipotética.** In: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu, 2015. Anais. p.1-12, 2015.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de taludes.** São Paulo, Oficina de textos, 2012, 192p.

ICOLD. **Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences.** 144 f. Bulletin 121. 2011.

MALHOTRA, A; GUPTA, K; KANT, K. Laser Triangulation for 3d profiling of target, **International Journal of Computer applications**, Vol. 35, No. 8, p. 47-50,2011.

PALHETA, E. S. de M. **Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da Ilha de Mosqueiro – Pará empregando na prospecção hídrica subterrânea.** 269 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará. Belém - PA. 2008

RIBEIRO, C. C. **Estudo sobre o comportamento geomecânico de rejeito de mineração de zinco.** 113 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba - PR. 2015.

SILVA, D. R. de P. **Avaliação da contribuição de sistemas de fraturas nas condições de fluxo e estabilidade de encostas.** 92 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2013.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos.** In: Capítulo 19. Tratamento de Minérios. LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. 5ª Edição, pág. 831-896. 2010.

STEMMER IMAGING. Knowledge base. **3D machine vision – technical basics and challenges.** Disponível em: <https://www.stemmer-imaging.co.uk/en/knowledge-base/3d->

machine-vision. Acesso: 17 Ago. 2017.

SUN, P; WANG, S; GAN, H; LIU, B; JIA, L.

Application of HEC –RAS for forecasting in perche driver – A case of hilly region, China.

7 f. In: 3rd International Conference on energy

materials and environment Engineering,Zhuhai, 2017. **Anais.** , 2017.

XIONG, Y. F. A Dam break analysis using HEC RAS, **Journal of water Resource and protection**, S/Vol., No. 3, p. 370-379, 2011.