

## Mitigação de ruptura de rejeito com uso de barreiras dinâmicas – caso de Brumadinho

Felipe Gobbi 1

Diretor Técnico, FGS Engenharia e Geobrugg AG, Porto Alegre, RS, Brasil, [felipe@fgs.eng.br](mailto:felipe@fgs.eng.br)

Nadine Feiger 2

Gerente de R&D Hydro and Snow, Geobrugg AG, Romanshorn, Suíça, [Nadine.Feiger@geobrugg.com](mailto:Nadine.Feiger@geobrugg.com)

Bruno Denardin 3

Engenheiro, FGS Engenharia, Porto Alegre, RS, Brasil, [bruno@fgs.eng.br](mailto:bruno@fgs.eng.br)

José Simão Rocha 4

Engenheiro, VALE, Belo Horizonte, MG, Brasil [jose.simao@vale.com](mailto:jose.simao@vale.com)

Adolfo Andrade 5

Engenheiro, FGS Engenharia, Nova Lima, MG, Brasil, [adolfo@fgs.eng.br](mailto:adolfo@fgs.eng.br)

**RESUMO:** A ruptura da barragem de Brumadinho consistiu em um acidente de barragem sem precedentes no Brasil. Após a ruptura um volume significativo de rejeito permaneceu dentro da área do antigo reservatório da barragem. Em inspeções pós evento, constatou-se a abertura de trincas na porção de montante destes taludes de rejeito remanescentes, caracterizando um potencial de falha de cerca de 420.000m<sup>3</sup>. Como as áreas de jusante mantinham atividades, medidas de proteção foram estudadas a fim de não expor estas áreas a riscos de fluxo de rejeitos. Uma destas medidas foi o emprego de barreiras dinâmicas contra fluxo de detritos. Este artigo apresenta as simulações de fluxo oriundas de uma potencial ruptura do material remanescente da barragem, o dimensionamento das estruturas flexíveis para proteção contra o fluxo e por fim um relato das obras de implantação destas estruturas. Note que as alturas de fluxo e velocidades obtidas das simulações demandaram o desenvolvimento de barreiras dinâmicas sem precedentes.

Duas barreiras dinâmicas para pressões de impacto de até 350kPa já foram instaladas e encontram-se em funcionamento como mitigação de risco neste local.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barreiras dinâmicas, fluxo de detritos, impacto dinâmico, simulações de fluxo.

**ABSTRACT:** The Brumadinho dam failure was an unprecedented dam accident in Brazil. After the collapse, a significant volume of tailings remained within the area of the old dam reservoir. Post-event inspections revealed cracks in the upstream portion of these remaining tailings slopes, characterizing a potential failure of around 420,000m<sup>3</sup>. In order to avoid any risk to the working teams on the downstream area, protective measures were studied to mitigate these risks. One of these measures was the use of dynamic barriers against debris flow. This article presents the flow simulations from a potential rupture of the material remaining in the dam, the design of the flexible structures to protect against the flow and finally a report on the work to install these structures. Note that the flow heights and velocities obtained from the simulations required the development of unprecedented dynamic barriers. Two dynamic barriers for impact pressures of up to 350kPa have already been installed and are in operation as risk mitigation at this site.

**KEYWORDS:** Dynamic barriers, debris flow, dynamic impact, debris flow simulations.

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata de um acidente de barragem localizada no quadrilátero ferrífero. No ano de 2019 ocorreu a ruptura global da estrutura, tendo como resultado a liquefação e fluxo de 9,7Mm<sup>3</sup> de rejeito, o que equivale aproximadamente a 75% da capacidade do reservatório da barragem (Robertson, et al, 2020), as consequências do acidente são reportadas em De Lima, et al. 2020 e outras publicações.

Imediatamente após o evento foram iniciados os trabalhos de recuperação da área, com a remoção do material de rejeito depositado no canal bem como as ações para remoção do volume remanescente no antigo reservatório. Parte destes trabalhos consiste no monitoramento constante dos taludes remanescentes dentro do antigo reservatório, para avaliar a sua estabilidade e o risco de gerarem novos fluxos de rejeitos.

Embora estejam em condição de equilíbrio, e o monitoramento não indique atualmente movimentação deste material, mapeamentos progressivos identificaram trincas nos taludes remanescentes o que levantou o risco de ocorrência de novas mobilizações destas massas.

Os resultados destes estudos mostraram que a massa delimitada pelas trincas estava em uma condição próxima do limite de estabilidade, além de identificar mais duas cunhas hipotéticas com potencial de mobilização, totalizam um volume, cerca de 420.000 m<sup>3</sup>.

As consequências de uma eventual ruptura destas cunhas foram estimadas com base na simulação de fluxo gerado pelos volumes estimados. Estas simulações resultaram na determinação das ondas e velocidades de fluxo esperadas.

Embora o evento tenha sido um fluxo de rejeito liquefeito, é importante notar a semelhança deste tipo de evento com um *mud flow* natural. Pois um fluxo contendo uma quantidade substancial de sólidos é descrito como *debriflow* ou *mudflow*, e este fenômeno é amplamente estudado na geotecnia e na hidrologia. Uma vez que o fluxo ocorre a interação entre os sólidos e fluido viscoso é processo colisional complexo, e a geração de excesso de poropressão reduz drasticamente a capacidade de geração de atrito nesta massa, e por outro lado gera uma grande quantidade de energia de movimento para manter esta massa em movimento (Iverson, 1997; Takahashi, 1991; Van Dine, 1996; Rickmann, 1999). O comportamento do fluxo, de onde se obtêm as alturas de fluxo e velocidades são comumente estimados/obtidos de correlações empíricas ou utilizando modelos numéricos, como os apresentados em Hohermuth et al. (2014), Raimat, C, et al (2013), Schraml, K. et al (2015) and others. Dada a estas semelhanças, foi concebido um projeto utilizando como solução barreiras flexíveis contra fluxo de detritos como medidas de mitigação ao fluxo de rejeitos. O objetivo destas barreiras é receber o impacto, reduzir a energia do fluxo e conter o volume de rejeito. Atualmente duas destas estruturas já foram instaladas no Córrego do Feijão. O presente artigo tem como objetivo apresentar os principais aspectos deste projeto e obra, descrevendo as cunhas críticas, as premissas de cálculo apresentando as simulações de fluxo que foram desenvolvidas e os seus resultados, o dimensionamento das estruturas bem como aspectos críticos para a implantação das obras no local.

## 2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA REGIÃO DE PROJETO

### 2.1. Localização da região de estudo, geologia básica e materiais ocorrentes

A área mencionada neste artigo fica localizada na zona rural da cidade de Brumadinho em Minas Gerais, tendo coordenadas médias em UTM de Long. 591642 E e 7.774.729 E (WGS 84 Zona 23S), estando o antigo barramento na cabeceira da bacia, com um canal a jusante que tem cerca de 2,00 km de comprimento, dos quais cerca de 800 metros são propícios para a instalação das linhas de barreiras. Abaixo uma imagem de satélite apresenta a região, indicando trecho de interesse do projeto.

O trecho de interesse foi lançado sobre o mapa geológico da região, onde é possível verificar que todo o alinhamento fica localizado sobre a formação denominada como Suíte Sousa Noschese, que está inserida dentro do complexo Ortognáissicos Bonfim, composto por terrenos granito-gnáissicos constituídos por tonalitos migmatizados a gnaisses granodioríticos. Essas litologias ocorrem bastante intemperizadas e muito estruturadas com exposições, em ravinas e voçorocas, e os solos associados a esta formação apresentam capacidade de suporte que em geral elevada.



Figura 1: Localização do canal de projeto a ser tratado (Fonte: Google Earth).

Na margem esquerda do talvegue ocorrem no topo do talude solo residual do granito gnaisse, em sequência subordinada temos estreita faixa de material silto-argiloso de espessura centimétrica a decimétrica. Se verifica também uma espessa camada de conglomerados constituído por clastos e pequenos blocos em sua maioria de formações ferríferas compactas, na base do talvegue. Abaixo algumas fotografias ilustram a condição da visita inicial e a condição já escavada do talude, que corroborada a hipótese inicial.



Figura 2: Fotografias dos materiais na visita inicial e na fase de escavação, validando os materiais previstos.

Na margem direita os materiais naturais do canal são os mesmos da margem esquerda, contudo devido ao fluxo de rejeitos da barragem se encontra um grande depósito de rejeito depositado na margem, bem como em uma espécie de bolsão dentro do talude. A hipótese mais provável, é que a energia da onda escavou o material natural, que foi substituído pelo rejeito. Nesta margem ainda se verificou a presença de um grande aterro, denominado como TCF (Terminal de Carregamento Ferroviário), que era parte integrante das operações de mineração pré-ruptura. É interessante apontar que na interface do aterro do TCF com o terreno natural foi encontrada uma camada drenante, composta por blocos de rocha (rachão) de dimensões variadas. Abaixo uma seção do canal exemplifica os materiais ocorrentes.

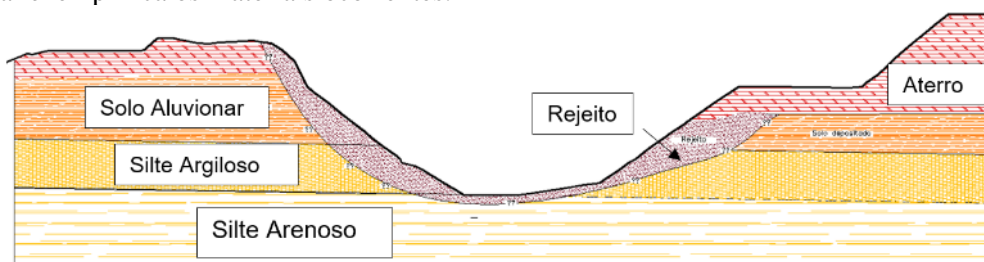


Figura 3: Seção do canal em questão

## 2.2. Caracterização do rejeito local, das trincas mapeadas e cunhas hipotéticas

É importante destacar que os ensaios de caracterização do rejeito, mapeamento das trincas e análises das cunhas não foi contemplado no desenvolvimento deste trabalho, tendo sido uma etapa pregressa, trabalho desenvolvido por outra empresa projetista. Os resultados do referido estudo foram disponibilizados, em formato de relatórios técnicos, para a serem avaliados incorporando as informações neste projeto. Foram realizados ensaios de caracterização física e de resistência mecânica do rejeito local, que corroboraram as observações de campo, comprovando que o material apresenta resistência muito baixa e uma granulometria muito fina, compatível com o grupo ML-CL do sistema SUCS, que representam materiais siltosos e argilosos. Estas características são fundamentais para a definição do paramento para a retenção dos mesmos, conforme

será apresentado nos itens seguintes. No referido documento também estava detalhada a posição das trincas identificadas no talude de rejeitos remanescentes da antiga estrutura, estas localizadas na porção mais à montante, próximo do limite do terreno natural com rejeito. Estas trincas eram espessas e longas, delimitando uma massa com potencial instável. Em adição as trincas, utilizando os dados de ensaios do rejeito, foram simuladas seções de cálculo, cujos resultados mostram mais duas cunhas hipotéticas, seções com baixo FS, e pelas análises desenvolvidas as 4 cunhas totalizam 420.000 m<sup>3</sup> de rejeito com potencial de mobilização, indicadas na

Figura 4. Em função da possibilidade do movimento destas cunhas, foi iniciado o projeto para as possíveis intervenções, que se limitaram a estruturas dinâmicas contra fluxo de detritos, visando mitigar os riscos das equipes de trabalho de jusante.

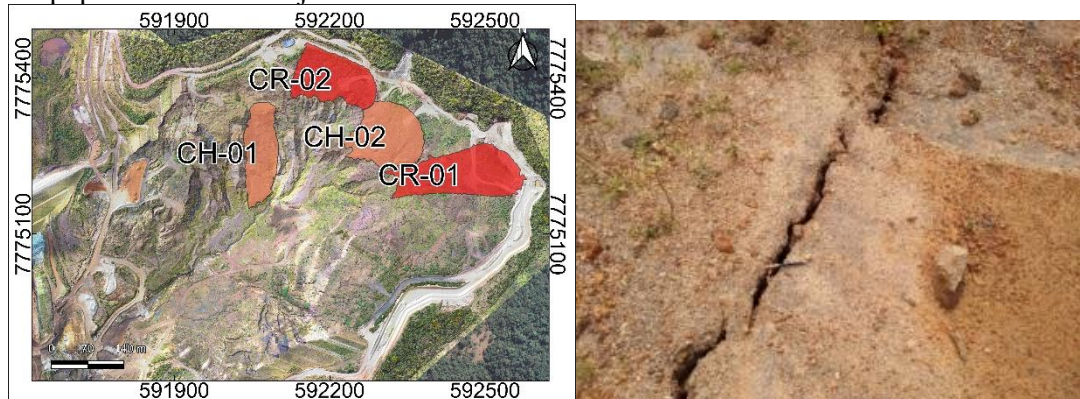


Figura 4: Localização das cunhas reais e hipotéticas, e detalhe de uma das trincas mapeadas

### 3. SIMULAÇÕES DE FLUXO DE REJEITOS

Determinar quais são as velocidades de onda e altura previstas é uma tarefa complexa, pois são muitos os parâmetros que afetam o comportamento deste evento, bem como os resultados das simulações. As simulações hidráulicas de *dam breach* possuem um procedimento e modelos bem aceitos na engenharia hidráulica, com resultados satisfatoriamente assertivos. Tentativas de utilização destes modelos para modelagem de corridas detriticas, na geotecnia, encontra dificuldades em função da natureza complexa dos mesmos. Caracterizado como um fluido não newtoniano, na verdade as corridas detriticas são mais complexas do que isso, pois são fluidos bi-fásicos (sólido + água + ar) com forças de interação e colisionais entre as partículas. Neste sentido, modelos como o de Voellmy-Salm, Wendeler (2016) tendem gerar resultados mais assertivos nas simulações numéricas de corridas detriticas, ou *debris flows*.

Rupturas de barragem de rejeito geram um fluxo também bí-fásico, entretanto sem os clastos de grande dimensão como as corridas detriticas, logo a aplicabilidade de modelos hidráulicos pode representar melhor este tipo de fenômeno. Entretanto a presença acentuada de sólidos pode também dificultar a modelagem destes fluidos apenas com uma variação de viscosidade naqueles modelos. Uma retroanálise da ruptura da barragem utilizando o modelo de Voellmy Salm é apresentada por Gobbi (2024), e traz algumas discussões a este respeito.

Para o desenvolvimento do projeto das estruturas de proteção mencionadas, foram disponibilizadas simulações de estudo de ruptura hipotética utilizando modelagem hidráulica com a ferramenta *Riverflow 3D*, a sua metodologia específica não será abordada neste artigo.

Em paralelo foi realizada pelos autores deste trabalho uma modelagem com o modelo de Voellmy Salm, utilizando o programa RAMMS Rapid Mass Movement Simulation, para fim de comparação e determinação de cenários a serem considerados nas condições de carregamento da estrutura.

De maneira bastante simplificada, este descreve a interação das partículas do fluxo em função do atrito seco de Coulomb ( $\mu$ ) e do atrito visco-turbulento ( $\xi$ ), que representa a interação entre as partículas sólidas e porção fluída do fluxo. As análises são desenvolvidas partindo do modelo digital do terreno, o MDT, e é necessário definir a zona de partida das massas instáveis (trincas mapeadas) com uso de polígonos, associando uma espessura para cada um atingindo o volume desejado da análise.

Os parâmetros utilizados na simulação foram aqueles determinados na retroanálise da ruptura da B1 (Gobbi, 2024). Como a quantidade de água presente na massa de rejeitos atual é inferior à quantidade presente no reservatório original (ou seja concentração volumétrica de sólidos atual é superior ao do reservatório),

entende-se que a utilização dos parâmetros de retroanálise é uma medida conservadora e análises paramétricas foram conduzidas a fim de se testar o efeito da variação dos parâmetros nos resultados das análises. Ao final das análises foi realizado um comparativo entre a simulação realizada disponibilizada (Riverflow 2D) e as simulações realizadas neste trabalho. A Figura 5 apresenta a comparação de altura de onda e velocidade ao longo da seção transversal na posição da malha 03, análise comparativa entre as ferramentas de cálculo Riverflow 2D e RAMMS. É possível identificar que as alturas de onda são bastante semelhantes nos dois modelos, e que a velocidade de impacto é ligeiramente inferior nas simulações realizadas com o RAMMS.

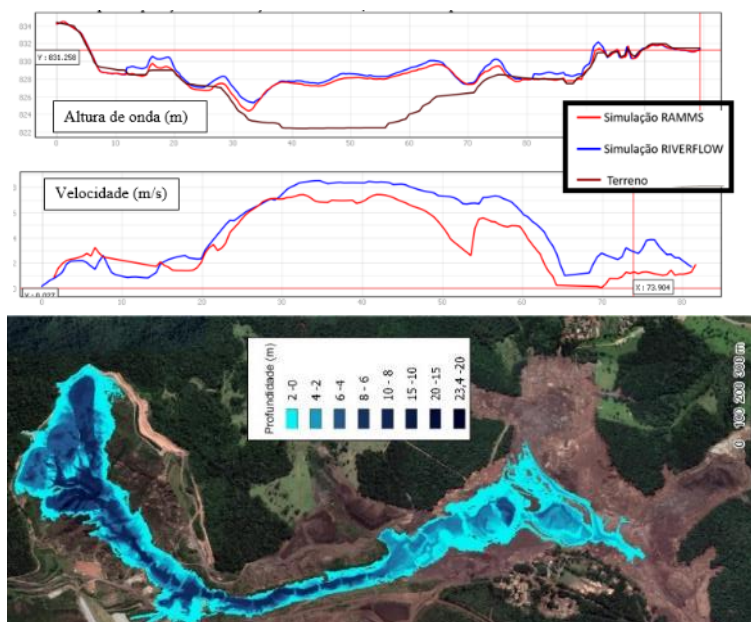


Figura 5: Comparativo entre os resultados da simulação Riverflow 2D e RAMMS na seção da malha 03 e resultado da simulação no MDT sem barreiras.

## 4. DIMENSIONAMENTO DAS BARREIRAS

### 4.1. Disposição das estruturas

Tendo definido a configuração necessárias às estruturas foi desenvolvida uma nova análise de fluxo rejeitos, considerando a inserção no MDT de análise as escavações projetadas associadas aos paramentos projetados. Se destaca que o RAMMS não é capaz de computar o funcionamento das estruturas no fluxo, e não verifica o dimensionamento das mesmas, considera as estruturas como barramentos no canal de resistência infinita a serem transpostos pelo fluxo. O objetivo destas análises consiste em verificar se as intervenções no canal afetam o máximo alcance da onda de rejeito, protegendo as áreas de jusante. Abaixo se apresenta as duas imagens com a mancha de inundação das ondas nos dois cenários, o MDT sem as intervenções e o MDT com as estruturas implementadas.

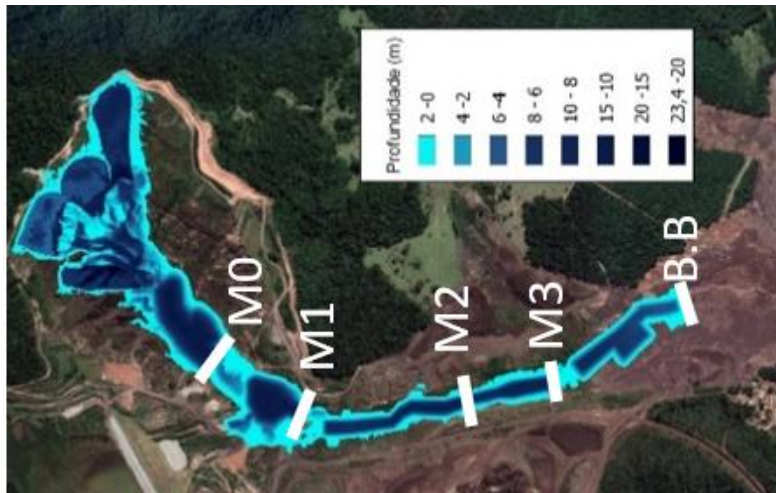


Figura 6: Resultado da simulação considerando as intervenções implementadas no MDT de cálculo

A análise comparativa entre as simulações mostra que sem as estruturas (Figura 5), a onda atinge uma distância de 3.7 km a jusante do barramento, enquanto que com as estruturas (Figura 6) a máxima distância reduz para 2.2 km, uma redução significativa. E ainda é notório nas simulações o acúmulo de material junto das posições de execução da barreira, indicando que as estruturas em questão são eficientes para a retenção dos rejeitos.

#### 4.2. Dimensionamento estrutural

Com base na altura de onda e velocidade de fluxo os esforços atuantes na estrutura são determinados somando-se as componentes estáticas e dinâmicas, de acordo com a metodologia proposta por Wendeler (2016).

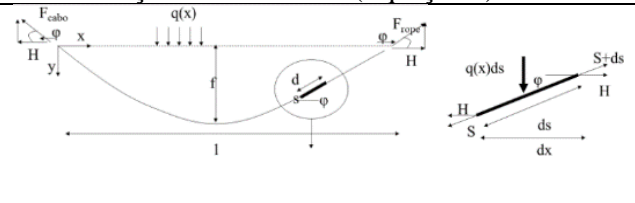
$$F = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (h_{fl} + \Delta h)^2 + C_d \cdot h_{fl} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde  $\gamma$ : peso específico da massa 17,5 kN/m<sup>3</sup> (característico rejeito);  $\rho$ : massa específica do rejeito: 1,75 ton/m<sup>3</sup>;  $h_{fl}$ : altura da onda (obtida das simulações);  $\Delta h$ : altura galgamento (ou solapamento);  $C_d$ : coeficiente 1,0 – segundo Wendeler (2016);  $v$ : velocidade (obtida das simulações)  $F$  (kN/m): Força por metro aplicada à barreiras em função das cargas estática e dinâmica.

Com a Equação 1 e os parâmetros obtidos das simulações foram calculados os esforços para o impacto da primeira onda e impactos subsequentes, incluindo o galgamento. Como exemplo são apresentadas as solicitações para o primeiro impacto nas estruturas. A interação da solicitação com a resposta da estrutura (barreira dinâmica) não é trivial, pois as cargas nos elementos variam de acordo com a deflexão da estrutura. A solicitação pode ser obtida pela resolução da equação da carga em cabos, indicada na Equação 2. Entretanto esta integração só pode ser resolvida numericamente. Entretanto para fins de engenharia pode ser resolvido utilizando através de uma série de Taylor para o cálculo das forças nos elementos (Equação 3).

	hfl (m)	v (m/s)	F (kN/m)
Malha 00	11,1	9,83	2.392
Malha 01	5	6,78	500
Malha 02	8,7	4,4	869
Malha 03	3,4	5,3	218

$\int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{Q}{hfl}\right)^2} dx - s_0 (1 + \alpha_1 \Delta t) + \frac{H}{EA} \int_0^l \left(1 + \frac{Q^2}{H^2}\right) dx$ <p>Eq. 2:</p>	 $H^3 + H^2 EA \left[1 - \frac{1}{s_0} (l - \alpha_t \Delta t s_0)\right] - \frac{EA}{2s_0} \int_0^l Q^2 dx$ <p>Eq 3</p>
---	--

Este procedimento de cálculo deve ser validado e aferido com base em testes em escala real. Então com base nos modelos numéricos calibrados em ensaios em escala real os dados podem se extrapolados para cenários distintos de carregamentos em relação àqueles testados em escala real. Como as solicitações deste projeto eram substancialmente superiores às usuais, consequentemente a estrutura resultante possui uma quantidade muito superior de cabos, malhas e ancoragens. As fundações dos postes, que normalmente consistem em três chumbadores (dois tracionados e um comprimido) foram substituídas por bloco de estacas

raiz. Por exemplo, na barreira Malha 03 cada bloco de fundação necessitou de 07 estacas raiz com diâmetro de 310mm, inclinadas e verticais a fim de combater os esforços horizontais oriundos das tensões de impacto. Neste conjunto 4 estacas funcionam a tração e 3 a compressão.

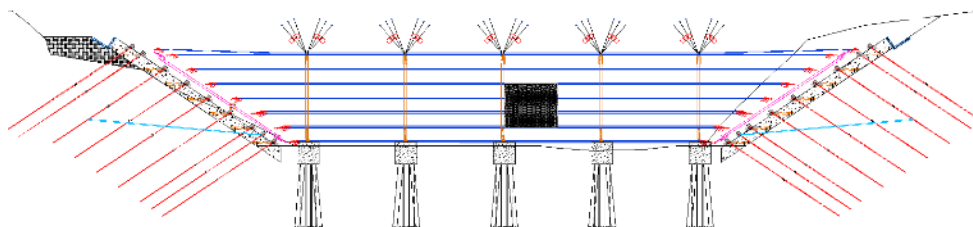


Figura 7: Configuração geral da estrutura Malha 03

### 4.3. Capacidade de retenção

Do ponto de vista estrutural a barreira possui capacidade de retenção dos impactos previstos. Diferente do conceito de aplicação para proteção contra fluxo de detritos, onde o objetivo é permitir a passagem da fase fluida e reter os clastos e árvores, por serem os materiais de maior capacidade destrutiva, no caso destas barreiras o objetivo era promover a retenção dos rejeitos finos. Conforme apresentado nos estudos de Wendeler (2016) quando a abertura da malha é igual ao D95 da fase sólida do fluxo é possível a retenção de 100% da fase sólida. O valor de D95 médio dentre os estudados é de 1,35 mm, entretanto uma grande variabilidade é encontrada nos resultados, tendo o valor mínimo de 0,075 mm e máximo de 9,5 mm. Foi adotada uma abertura de 2,0 mm como abertura máxima para a malha de retenção de finos. Como a referência para tal determinação é fundamentada em materiais de maior granulometria (corridas detríticas), entende-se que esta capacidade de retenção deve ser avaliada com o tempo e ajustada conforme necessidade. Para obtenção da abertura de 2mm, foi utilizado um conjunto de malhas: a) Malha ROCCO –Malha estrutural para suportar o impacto,  $\phi 300$ mm com 19 fios de 3mm e  $f_y > 1770$  Mpa Malha TECCO G45/2mm – malha secundária de transição da ROCCO  $\phi = 45$ mm fios de 2 mm  $f_y > 1770$  Mpa Malha polimérica com abertura menor do que 2mm

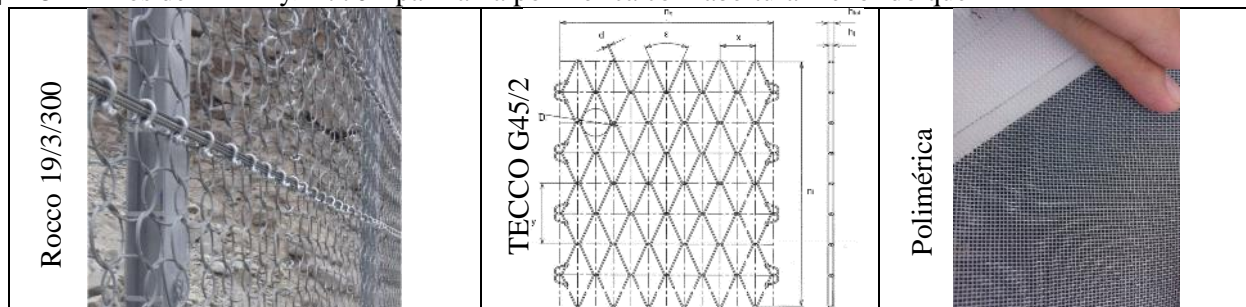


Figura 8: Malhas Utilizadas

## 5. IMPLANTAÇÃO DAS ESTRUTURAS

A implementação das estruturas teve início seu início em abril de 2022, com a execução da malha 02, malha 03 e barreira de blocos, estando estas na porção final do canal. As estruturas listadas foram priorizadas por estarem posicionadas fora da zona de atenção / zona vermelha para riscos, local este que possibilita a evacuação em tempo hábil. Após a limpeza inicial do canal, removendo rejeito acumulado e conformando os taludes das ombreiras de ancoragens das barreiras, o processo se mostrou-se desafiador. As condições do terreno natural ofertaram grande complexidade executiva, principalmente na ombreira direita devido a existência do aterro do TCF, com seu dreno de fundo em material pétreo sob presença de elevado volume de água, bem como os depósitos de rejeito em camadas não previstas. Tais características, aliadas a restrições do espaço, implicaram na instabilidade dos taludes para a geometria prevista em projeto e principalmente instabilidades das perfurações para construção das ancoragens. Os furos não apresentavam estabilidade para perfuração sem revestimento, e o revestimento por sua vez era inviável dada a dimensão das ancoragens de cabo espiral, que demandariam diâmetros de perfuração superiores a 200mm.

Diante disso, foi necessário alterar o sistema de ancoragem das ombreiras, substituindo as ancoragens de cabo espiral por duas cortinas atirantadas. Nestas cortinas foram posicionados *inserts* para a utilização de cabeças flexíveis de ancoragem em substituição às ancoragens de cabo espiral. As cortinas também foram

dimensionadas para a estabilização dos taludes laterais, e a utilização do método descensional permitiu a estabilização dos taludes concomitante com as escavações do terreno. A conclusão da obra de implantação das malhas, bem como escavações das bacias e execução da barreira de blocos, se deu em julho de 2023.



Figura 9: Fotografias das (a) instabilidades no talude, (b) uma das cortinas em execução e (c) da malha 03 concluída.

## 6. CONCLUSÕES

A ruptura da barragem mencionada neste artigo, consistiu em um grave acidente dentro do histórico da engenharia brasileira. Incontáveis ações e esforços foram e vem sendo empregados a fim de se reestabelecer as condições de segurança e reparar dentro do possível os danos. Durante este processo foi identificado o potencial de reativação de parte do rejeito remanescente no antigo reservatório. Para mitigar o risco às equipes de trabalho a jusante da antiga barragem, bem como mitigar os danos ambientais de uma possível nova ruptura de rejeitos, foi elaborado um projeto inovador utilizando barreiras flexíveis de proteção contra fluxo de detritos, adaptadas para proteção contra fluxo de rejeitos, além de outras estruturas. Este artigo apresentou as simulações de fluxo, o dimensionamento das barreiras, apresentou aspectos construtivos e os resultados até o momento da implantação destas estruturas. Esta alternativa consistiu em soluções de rápida instalação e com capacidade resistente compatível com as mais severas considerações de cargas de impacto.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à todas as equipes envolvidas no desenvolvimento dos estudos, projetos e implantação das obras apresentada neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARNEIRO, M.A. O complexo metamórfico Bonfim setentrional (Quadrilátero Ferrífero), Minas Gerais: litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano, 1992. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1992.
- De Lima, R. E., de Lima Picanço, J., da Silva, A. F. & Acordes, F. A. An anthropogenic flow type gravitational mass movement: the Córrego do Feijão tailings dam disaster. *Landslides* 17, (2020).
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – Micropile Design and Construction. Publication N° 05-039 IBC, International Building Code. 2006.
- Hohermuth, B.; Graf, C., 2014: Application of debris-flow simulations in practice. [Abstract] In: Abstract Volume, 12th Swiss Geoscience Meeting, 2014. Bern, SCNAT. 200-201.
- Gobbi, F., Vieira, G., Daudt, J., Denardin, B. (2024) Brumadinho tailing dam break back calculation using the Voellmy Salm model. No prelo.
- Iverson, R. 1997. The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics*, 35, 3 / 1997. P. 245 – 296.
- NOCE, C.M. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, 1995, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo/USP, 1995.
- Robertson, P. K., de Melo, L., Williams, D. J. & Wilson, G. W. Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I. <http://www.b1technicalinvestigation.com/> (2020).
- Rickenmann, D. (1999) Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, n. 19, 1999
- Takahashi, T. 1991. *Debris Flow*, 165 pp. A.A. Balkema, Brook-field, Vt., 1991.



Raïmat, C.; Riera, E.; Graf, C.; Luis-Fonseca, R.; Fañanas Aguilera, C.; Hürlimann, M., 2013: Experiencia de la aplicación de RAMMS para la modelización de flujo tras la aplicación de las soluciones flexibles vx en el barranc de Portainé. In: Alonso, E.; Corominas, J.; Hürlimann, M. (eds) VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Palma de Mallorca, Junio 2013. Barcelona, CIMNE. 1131-1144.

Schraml, K.; Thomschitz, B.; McArdeell, B.; Graf, C.; Hungr, O.; Kaitna, R., 2015: Modeling Debris-Flow Runout Pattern on a Forested Alpine Fan with Different Dynamic Simulation Models. In: Lollino, G.; Giordan, D.; Crosta, G.B.; Corominas, J.; Azzam, R.; Wasowski, J.; Sciarra, N. (eds) Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2. Landslide Processes. London, Taylor & Francis. 1673-1676

SHINZATO, E., CARVALHO FILHO, A. Pedologia. In: Projeto APA Sul RMBH. Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005.v.5.

VanDine, D. F. 1996 Debris Flow Control Structures for Forest Engineering. Res. Br., B.C.Min.For., Victoria, B.C., Work Pap. 08/1996

Wendeler, C. Debris-Flow Protection Systems for Mountain Torrents. WSL Berichtem 2016. Tese de doutorado.