

## RELATÓRIO FINAL

### Análise computacional da ruptura da Barragem I na Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho

Autor: CIMNE - Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (UPC - Universidad Politécnica de Catalunya)

Data: Agosto de 2021

#### Resumo (*executive summary*)

Em 25 de janeiro de 2019, a Barragem I do complexo minerário de Paraopeba, localizado em Brumadinho (Minas Gerais, Brasil), rompeu-se abruptamente. Como consequências diretas da ruptura ocorreram mortes de um grande número de pessoas e extensos danos econômicos, sociais e ambientais.

O rompimento da barragem se iniciou aproximadamente às 12:28 do horário local. A ruptura foi registrada por duas câmeras de vídeo, uma situada em frente à barragem e a outra na parte traseira. As imagens mostram uma ruptura repentina, que progrediu para atingir cerca de 80% da face da barragem em torno de 5 segundos. Os materiais liberados pela ruptura rapidamente se converteram em uma onda de lama. A ruptura inicial foi acompanhada por uma sequência de falhas retrogressivas dos taludes, que progrediram na direção superior através dos rejeitos. Essas massas liberadas contribuíram para a onda de lama subsequente. Todo o processo de rompimento retrogressivo foi praticamente concluído em cerca de 5 minutos. A topografia após a ruptura indica que 9,7 milhões de m<sup>3</sup> de material escaparam da barragem, aproximadamente 75% do volume existente antes da ruptura.

O lançamento de rejeitos na barragem foi interrompido cerca de 2,5 anos antes do rompimento. Na ocasião, não estavam sendo executadas operações em larga escala, o lago no topo da barragem tinha sido drenado e o sistema de drenagem de água pluvial tinha sido melhorado. Os registros piezométricos indicavam uma redução lenta, mas constante. O rompimento não foi provocado por um aumento geral dos níveis ou do fluxo de água dentro da barragem. Também não há evidências de que estivesse ocorrendo erosão interna (*piping*) relevante na barragem. O rompimento ocorreu sem sinais aparentes de danos antes da ruptura e não houve nenhum alerta do sistema de monitoramento.

A VALE, proprietária do complexo minerário de Paraopeba, celebrou com o Ministério Público Federal (MPF) um Termo de Cooperação, pelo qual a VALE se comprometeu a contribuir e colaborar com as autoridades na investigação técnica das causas do rompimento. Um dos aspectos principais ajustados entre a VALE e o MPF foi a necessidade de se executar uma análise computacional especializada da Barragem I para esclarecer as causas do rompimento.

Nesse contexto, o CIMNE foi indicado pelo MPF e contratado pela VALE para executar atividades de análise, modelagem e simulação computacional para auxiliar na investigação das causas prováveis, determinantes e/ou concorrentes, do rompimento da Barragem I. O termo de referência estabelecia o software Plaxis 2D/3D como ferramenta de modelagem a ser utilizada no trabalho de simulação.

A fim de desenvolver um modelo numérico o mais próximo possível da realidade, as informações disponíveis da barragem foram examinadas criticamente, incluindo a história da construção da barragem, registros pluviométricos (com extensão de mais de 40 anos), e movimentações de superfície da barragem nos anos imediatamente anteriores ao rompimento.

Os dados de movimentação analisados foram obtidos principalmente por meios topográficos e observações de satélite. Evidências de movimentação da face da barragem a partir do satélite InSAR são bastante ambíguas e prejudicadas por ruído, mas o mesmo sistema claramente mostra a consolidação da parte central do reservatório onde estão localizados os materiais mais comprimíveis. As evidências topográficas também indicam que as pequenas movimentações da barragem durante o ano anterior não podem ser adequadamente interpretadas sem uma correlação com as atividades que estavam ocorrendo na barragem.

Atenção especial foi dada às operações realizadas no ano anterior ao rompimento. Elas envolveram operações de perfuração horizontal para instalação de drenos e perfuração de furos verticais para instalação de piezômetros. Um grave incidente ocorreu durante a perfuração do dreno horizontal DHP-15 que levou ao encerramento da campanha de instalação de drenos. Foram causados vazamentos visíveis de lama em vários pontos da barragem, que foram rapidamente contidos. O incidente provocou um aumento local e temporário nas pressões piezométricas da água e algum abatimento na barragem. Registros sismográficos sugerem que uma liquefação contida pode ter ocorrido na época.

É incontroverso que o rompimento da Barragem I envolveu o fenômeno do fluxo por liquefação. A liquefação é um processo associado ao aumento da poropressão, pelo qual a resistência ao cisalhamento é reduzida à medida que a tensão efetiva no solo se aproxima de zero. Apenas materiais contráteis estão sujeitos à liquefação. A liquefação está intrinsecamente relacionada ao comportamento frágil não drenado do solo.

Há uma grande variedade de potenciais gatilhos de liquefação. Em uma análise preliminar do caso foram descartados vários desses gatilhos, que foram considerados como não relevantes na situação em questão. A partir de um exame cuidadoso dos registros sismográficos também foi excluída a hipótese de um carregamento dinâmico, seja por terremotos ou atividades de mineração, como gatilho provável do rompimento. Não havia carregamentos dinâmicos próximos o suficiente do rompimento, sob os aspectos de tempo e espaço, embora a ruptura tenha deixado uma assinatura com características dinâmicas. O gatilho por *creep* e/ou por aumento da poropressão foram mantidos como hipóteses que mereceriam uma análise mais aprofundada.

A falha inicial ocorreu através dos rejeitos, sem envolvimento significativo de qualquer outro material, como os solos das fundações. Também é incontroverso que a maioria dos rejeitos da barragem eram fofos, contráteis, saturados e mal drenados e, portanto, altamente suscetíveis à liquefação. A caracterização geotécnica dos rejeitos foi considerada essencial para se obter um modelo computacional verossímil da ruptura. Assim, um grande esforço foi feito para se obter uma melhor caracterização geotécnica dos rejeitos. Para isso foi realizada uma nova e abrangente campanha de coleta de amostras e testes de laboratório. Esses resultados foram sempre considerados em conjunto com as informações anteriormente obtidas.

Os rejeitos não eram homogêneos. Havia gradações mais finas e outras mais grossas. As mais finas tinham permeabilidades mais baixas e estruturas mais contráteis - como indicado pelos valores de parâmetro de estado. Embora a resistência efetiva, medida pelo ângulo de atrito de estado crítico, fosse similar para todas as gradações, as mais finas tinham menor capacidade de mobilizar resistência em condições não drenadas. Essa situação ocorria no pico, mas era particularmente perceptível no estado crítico. Assim, rejeitos mais finos eram mais propensos à liquefação e mais perigosos, porque mais frágeis.

A resistência de pico em condição não drenada mostrou um efeito significativo da consolidação do caminho de tensões. A consolidação anisotrópica ( $K_0$ ) resultou em maiores resistências de pico

triaxial e maior fragilidade em condição não drenada. Essa descoberta foi significativa para a calibração do modelo, porque a consolidação do caminho de tensões no campo se aproxima mais da condição anisotrópica do que da isotrópica.

Não encontramos evidências de qualquer situação significativa de cimentação nos rejeitos, independentemente de sua classificação. Para avaliar o comportamento de *creep*, os efeitos da taxa de deformação dos rejeitos foram sistematicamente medidos em três diferentes materiais reconstituídos usando testes triaxiais de controle de taxas de deformação. A magnitude dos efeitos da taxa de deformação medidos nos rejeitos foi sempre pequena e não indicou um papel relevante do processo de *creep* no rompimento.

As diferenças entre gradações mais finas e mais grossas dos rejeitos são sutis e não podem ser bem representadas por medidas simples de classificação, como o teor de finos. Acontece que a permeabilidade de Kozeny-Carman, que depende de toda curva de classificação, é mais capaz de identificar gradações mais finas por se correlacionar bem, por exemplo, com as propriedades de estado crítico. A permeabilidade de Kozeny-Carman também incorpora o efeito do peso específico, para o qual existem diferenças entre os diferentes grupos de rejeitos.

Basear a distinção entre gradações mais finas e grossas na permeabilidade facilita a tradução dessa distinção para os resultados dos testes de CPTu. Com o auxílio de simulações numéricas avançadas desse teste, um critério baseado no excesso de poropressão medido por CPTu pode ser estabelecido para diferenciar gradações mais finas e mais grossas nos registros de CPTu disponíveis.

A aplicação sistemática desse critério resultou em mapas de zonas da barragem, identificando onde havia a presença mais abundante dos perigosos rejeitos de gradação mais fina. A distribuição que surgiu não era aleatória, mas revelou que a elevação de alguns setores da barragem resultou em rejeitos mais finos do que em outros. Essas informações de zoneamento foram utilizadas nos modelos numéricos.

Como o rompimento por liquefação observado no caso envolveu quase que exclusivamente os rejeitos, a modelagem de seu comportamento exige um modelo constitutivo capaz de representar o comportamento frágil do material em condição não drenada, uma característica fundamental para simular o fluxo por liquefação. Além disso, é essencial que o modelo seja definido em termos de tensões efetivas para que a construção, consolidação e a ruptura possam ser modeladas usando um único modelo e um único conjunto de parâmetros; caso contrário, não poderá ser garantida a consistência.

O Clay and Sand Model (CASM) foi selecionado para a modelagem dos rejeitos porque é capaz de reproduzir uma ampla gama de comportamentos do solo, de dúctil a muito quebradiço. Além disso, o CASM incorpora estados críticos e o parâmetro de estado  $\psi$  em sua formulação, sua faixa de aplicação varia de solos de granulação fina a grosseira, e vários de seus parâmetros têm um significado claramente identificável. O modelo constitutivo independente de taxas (CASM) foi significativamente estendido com a utilização de uma formulação viscoplástica de sobretensão para que os efeitos dependentes do tempo e da fluência (*creep*) pudessem ser simulados. Um novo algoritmo de integração que considera o componente viscoplástico do modelo foi desenvolvido. Esta nova formulação é referida como CASM-visco.

A calibragem do modelo e a determinação de seus parâmetros foi realizada usando todas as fontes de informação relevantes obtidas a partir dos testes *in situ* (especialmente CPTu) e testes de laboratório. Atenção particular foi dada aos valores de resistência não drenada a partir de tensões normalizadas (pico e residual / estado crítico), considerados essenciais para simular o tipo de falha

observado. Outros materiais (lama, diques, solo residual, drenos) foram caracterizados com base nas informações disponíveis, embora desempenhem um papel menor nas análises numéricas.

Um conjunto de análises numéricas foi executado para auxiliar na interpretação do rompimento. As análises incorporam as informações disponíveis sobre a geometria da barragem, histórico de construção, parâmetros de materiais e condições hidráulicas/ambientais. Por consistência, as análises foram realizadas em termos de tensão efetiva, usando os mesmos modelos constitutivos e parâmetros em todo o processo.

As simulações da história da barragem não mostram sinais de colapso iminente da barragem no momento da ruptura, mesmo quando fenômenos de *creep* e de aumento de precipitação são incorporados na análise. Na verdade, a estabilidade também é obtida mesmo que a análise seja continuada por um período de mais 100 anos. Este resultado sugere que algum fator ou evento adicional foi necessário para que a barragem rompesse.

Assim, outros mecanismos potenciais de gatilho foram examinados. Um deles diz respeito à sobrepressão de água associada à perfuração do furo B1-SM-13, que estava em andamento no momento da ruptura. Sob condições de tensão e hidráulicas semelhantes às do fundo do furo B1-SM-13 durante a perfuração, as análises numéricas mostram que, usando o modelo constitutivo e os parâmetros adotados para os rejeitos, pode ocorrer a liquefação local devido à sobrepressão de água e sua propagação pela barragem.

Ao se prescrever liquefação em uma zona limitada em torno do final do furo B1-SM-13, a simulação numérica 2D resulta em uma ruptura completa da seção da barragem. As características geométricas da ruptura e o padrão de deslocamentos resultantes são consistentes com as observações visuais. Em particular, o mecanismo de colapso obtido mostra uma ruptura dentro da barragem começando na crista e se estendendo até um local logo acima do dique de partida. O padrão de deslocamentos apresenta abatimentos na crista da barragem e protuberâncias para fora na base, conforme observado no início do rompimento.

Efeitos tridimensionais foram considerados por uma simulação 3D envolvendo uma fatia de barragem de 15 m de largura na seção onde o furo B1-SM-13 estava localizado. Considerando a liquefação em uma zona limitada ao redor do final do furo, a análise novamente resulta em uma ruptura completa da barragem muito semelhante à obtida nas análises 2D e, portanto, muito semelhante à real.

Outros gatilhos potenciais de liquefação semelhantes foram explorados na posição do furo B1-SM-09, que foi perfurado pouco antes de B1-SM-13 e era semelhante em posição e sobrepressão, e na posição do dreno profundo horizontal DHP-15. De forma semelhante ao furo B1-SM-13, a liquefação de uma zona limitada em torno das perfurações foi prescrita. No entanto, em nenhum dos dois casos uma ruptura geral da barragem é obtida; a zona de liquefação permanece contida, apresentando apenas um progresso limitado. Os exames de testes de CPTu perto da localização dos furos verticais mostram que o perfil do solo no local do furo B1-SM-13 era especialmente desfavorável em relação ao início e propagação da liquefação.

O entendimento e a experiência adquiridos com as simulações sugerem que a liquefação e, particularmente, sua propagação, podem ser muito sensíveis aos valores locais e distribuições de propriedades do material (especialmente permeabilidade, resistência e fragilidade), estado de tensão local e taxa de aumento da pressão da água. É provável que a ocorrência de liquefação e sua subsequente propagação descontrolada exija uma combinação particularmente desfavorável de circunstâncias.

O conjunto de análises numéricas realizadas permite concluir que a perfuração do furo B1-SM-13 é um potencial gatilho da liquefação que ocasionou o rompimento da barragem.

As análises realizadas não foram capazes de identificar outros gatilhos de liquefação. Em particular, os cálculos realizados incorporando apenas os efeitos de aumento da precipitação e do *creep*, isoladamente ou em combinação, não resultaram em um rompimento geral da barragem.