

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/80

## Modelação em MEF do Processo de Alteamento de uma Instalação de Rejeitados Considerando Cenários Distintos de Parametrização da Resistência e Dissipação de Poropressões

Bernardo Vasconcelos

Ex-Mestrando de Engenharia Civil (com especialização em Geotecnia) na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, TPF Consultores, Porto, Portugal, bernardojpvasconcelos@gmail.com

António Viana da Fonseca

CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, viana@fe.up.pt

Gonçalo Tavares

TPF Consultores, Lisboa, Portugal, goncalo.tavares@tpf.pt

### RESUMO:

A mineração tem-se revelado, ao longo da história da Humanidade, uma atividade fundamental no desenvolvimento e na manutenção do funcionamento da sociedade. Aproveitados os produtos de principal valor comercial, resta, do processo que levou à sua obtenção, quantidades volumosas de subprodutos não aproveitáveis – os rejeitados. O volume de rejeitados gerado exige a sua cuidada e planeada deposição, com recurso a estruturas e/ou técnicas geotécnicas, tipicamente barragens ou pilhas, de enorme suscetibilidade à liquefação. O comportamento do material pode ser definido recorrendo a métodos constitutivos mais simples, como é o caso do Mohr-Coulomb, ou outros, como os que recorrem aos conceitos da Teoria dos Estados Críticos, procurando contemplar a perda súbita de resistência. Este trabalho foca-se na simulação numérica de uma secção de uma barragem de rejeitados, construída pelo método de montante, com recurso ao Método dos Elementos Finitos e ao modelo Mohr-Coulomb, em ambiente PLAXIS, avaliando e testando a influência de modos distintos de representação da resistência e da poropressão, e suas dissipação e evolução em profundidade, nos resultados e na aproximação à realidade, nomeadamente a ocorrência de liquefação. Com os modelos preconizados, foi possível concluir qual dos modos de parametrização e modelação conduzem a resultados mais coerentes e representativos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rejeitados, Barragem, Métodos dos Elementos Finitos, PLAXIS, Poropressão, Dissipação.

**ABSTRACT:** Throughout the history of Humanity, mining has proved to be a fundamental activity in the development and maintenance of the society. Once the products of main commercial value have been exploited, large quantities of unusable sub-products are left over from the production process - tailings. The volume of tailings generated requires its careful and planned placement in geotechnical structures, typically dams or dry stacks, which are highly susceptible to liquefaction and demands specified geotechnical knowledge. The material's behaviour can be defined by simple constitutive methods, for example Mohr-Coulomb, or others, such as those based in the Critical State Theory concepts, seeking to take into account the rapid strength loss. This work focuses on the numerical simulation of a tailings dam section, built using the upstream method, with the help of the Finite Elements Method and the Mohr-Coulomb model in PLAXIS, in order to evaluate and to test the influence of distinct ways of modelling strength and poropressure and its dissipation and evolution in depth on the results precision, namely the occurrence of liquefaction. The taken models allowed to conclude which of the parameterisation and modelling methods lead to the most coherent and representative outputs.

**KEYWORDS:** Tailings, Dam, Finite Elements Method, PLAXIS, Porepressure, Dissipation.

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a construção de ferramentas, nos primórdios da Humanidade e na atualidade, passando pela criação de bens de luxo de ourivesaria até à tecnologia informática e à transição digital, essencial para o progresso e desenvolvimento da sociedade global, a mineração desempenha um papel central na gestão e nas atividades económicas dos países, representando em boa parte a riqueza de cada potência. Da mineração extraem-se matérias de alto valor – o minério –, mas também grandes volumes de material economicamente inaproveitável, como é caso do escombros, resultante da lavra e que poderá servir o enchimento das galerias quando encerradas (Russo, 2007), e dos rejeitados, advindos do processo de beneficiação do minério, começando com a britagem e terminando com a concentração, requerendo grandes quantidades de água, ver Luz e Lins (2018).

Os rejeitados, não podendo ser vertidos no meio ambiente devido às suas propriedades químicas, devem ser depositados em estruturas geotécnicas, designadamente barragens e pilhas de rejeitados. O elevado teor de água dos rejeitados, variável consoante as propriedades do minério e consequente processo de beneficiação e a existência ou não de processos de pós desaguentamento e espessamento do material, representa um desafio para a estabilidade destas grandes estruturas. Os rejeitados têm tipicamente propriedades distintas das observadas em solos naturais (Vick, 1983), constituindo uma espécie de solo siltoso solto, de peso volúmico elevado, suscetível à liquefação.

As barragens de rejeitados podem ter configurações espaciais e temporais diversas. No caso da construção de um só dique definitivo, aproxima-se à tecnologia das barragens de aterro comuns e a sua principal desvantagem é a necessidade de dispor de todo o material estrutural no início da sua construção, concentrando os custos no tempo (Vick, 1983). Há três técnicas de expansão que permitem diluir a construção ao longo do tempo (Figura 1), como é o caso do método de montante, o mais económico e por isso o mais utilizado, caracterizando-se por sucessivos alteamentos em direção ao interior do depósito, com diques de menor dimensão fundados no rejeitado já depositado, constituindo as barragens daquele tipo a maioria dos incidentes nestas estruturas (Rico et al., 2008). Outro destes métodos é, por oposição, o método de jusante, o mais dispendioso mas que procura assegurar maior estabilidade, fundando a expansão no terreno natural (Russo, 2007), com sucessivos aumentos do dique de partida em direção ao exterior do depósito. Resta mencionar o método de linha de centro, que combina a economia do primeiro e a estabilidade do segundo, fundando a expansão do dique de partida no terreno natural, por um lado, e nos rejeitados depositados, por outro (Albuquerque Filho, 2004).

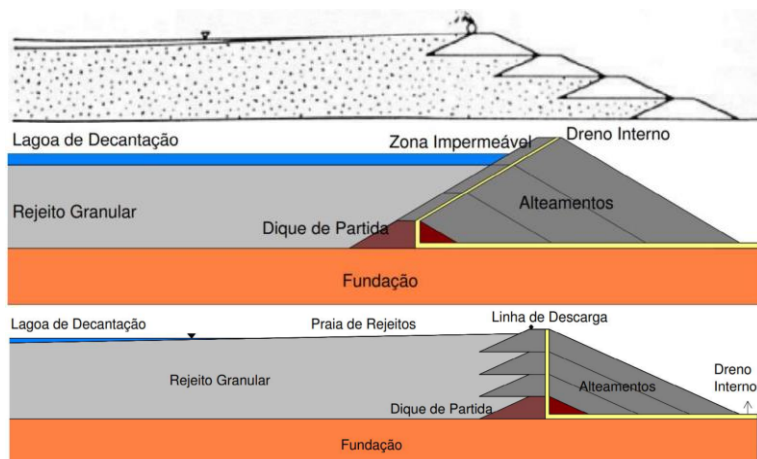


Figura 1. Diferentes Tipos de Alteamentos, adaptado de Vick (1983) e Albuquerque Filho (2004).

Os dados apresentados pela ICOLD (2011) mostram a vulnerabilidade destas estruturas, mais elevada que nas barragens de água. Uma parte considerável dos desafios estruturais das barragens de rejeitados prende-se pela sua passibilidade de ocorrência de rotura por liquefação, de acordo com Mogami e Kubo (1953) por anulação da tensão efetiva. De acordo com Viana da Fonseca (2012), o fenómeno de liquefação pode ser

originado por carregamentos cíclicos (liquefação cíclica) ou por carregamento rápido monotónico (liquefação estática), desencadeando uma diminuição súbita de resistência.

A simulação numérica entrega ferramentas que ajudam na avaliação da estabilidade e na previsão do comportamento dos materiais e de toda a estrutura das barragens de rejeitados, nomeadamente recorrendo ao Método dos Elementos Finitos, fundado na discretização de uma malha de elementos que obedecem a leis previamente definidas. Esta parametrização pode seguir vários modelos constitutivos, baseados em conceitos teóricos diversos, escolhidos visando a maior adequação do método à resolução do desafio geotécnico.

A Teoria dos Estados Críticos baseia-se na proximidade de cada partícula de material ao estado crítico (parâmetro de estado,  $\psi$  (Been, 1999)) – estado para o qual o solo tende quando solicitado, entrando em regime de fluido friccional com resistência residual (o material encontra-se liquefeito), Schofield e Wroth (1968). O volume de vazios crítico para cada estado de tensão caracteriza a Linha dos Estados Críticos (LEC), dividindo o espaço de tensão entre solos soltos, contrácteis, mais susceptíveis à liquefação e solos densos, dilatantes (Figura 2).

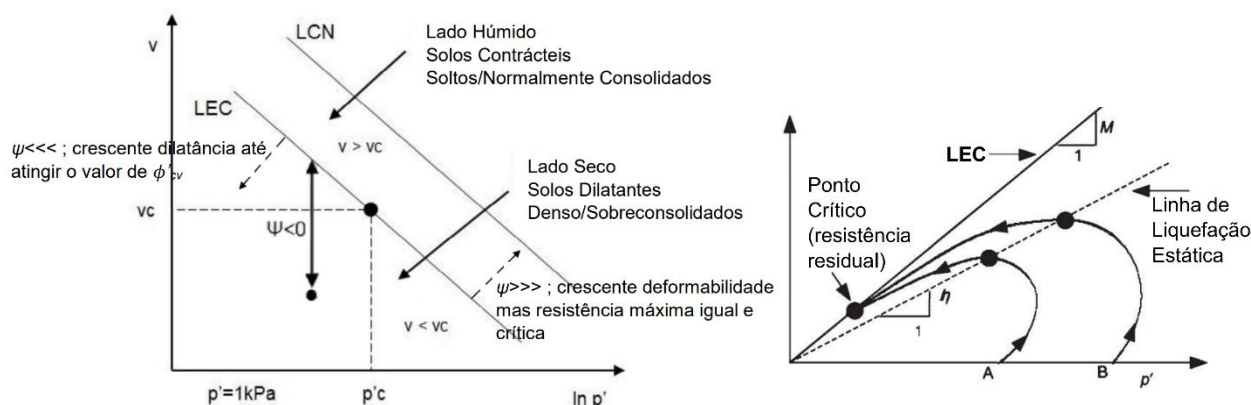


Figura 2. Estado dos Solos (adaptado de Maranhã das Neves, 2016, e de Carneiro, 2021), Linha de Liquefação (Been and Jefferies, 2004).

O modelo teórico de Mohr-Coulomb, simples porém útil e informativo, baseia-se no pressuposto de um comportamento elástico (com módulo de Young,  $E$ , constante) perfeitamente plástico (deformação a volume constante), delimitando os estados possíveis dos impossíveis ou instáveis através da envolvente de rotura, definida pelo ângulo de atrito efetivo a volume constante e pela coesão efetiva.

## 2 A BARRAGEM

A barragem sobre a qual o presente trabalho se debruça surgiu da necessidade de deposição de rejeitados oriundos da exploração de minério de cobre, zinco e chumbo, principalmente. A produção perdura há algumas décadas e não se espera que o seu término esteja próximo, como tal, a estrutura carrega consigo um vasto historial, em tudo fulcral para a compreensão do comportamento do material depositado, que deverá atingir dezenas de milhões de metros cúbicos. Como na maioria das estruturas deste género, pelas propriedades que compõem os rejeitados, pelo modo como é possível depositar e pela configuração estrutural, deve avaliar-se o comportamento do material e dos solos em vários estágios da sua expansão.

### 2.1 Histórico de Deposição e Expansão

Diferentes fases da produção impõem distintos modos de construção e deposição. No caso de estudo, iniciou-se a deposição após a construção de um dique – o dique de partida – nas zonas em que o terreno natural tem cota mais baixa, constituindo um depósito. A deposição nesta fase era submersa, com rejeitado em polpa, e por isso muito solto e com substancial susceptibilidade à liquefação. A primeira expansão deu-se no dique de

partida, onde este existia, com alteamentos para jusante, em três fases (três alteamentos) que duraram alguns anos.

Posteriormente, a deposição prosseguiu de modo emerso, até se revelar necessária uma nova expansão que permitisse não interromper a produção, havendo em cada instante volume disponível na barragem de rejeitados. Assim, iniciou-se um processo de deposição por células, construídas em escombros sobre o rejeitado, constituindo, desta forma, cada par de células, um pequeno reservatório. Atendendo ao fenômeno de perda súbita de resistência já mencionado, e dado o ritmo de produção, que impede uma demorada consolidação com dissipação dos excessos de poropressão, o material começou a sofrer um processo de espessamento, com perda benéfica de água (continuando, contudo, saturado). A deposição de rejeitado, em forma de espessado, traduz-se num aumento dos custos, mas permite um processo de alteamento mais estável, com comportamento material mais resistente e menos vulnerável à liquefação, bem como menor segregação na praia (criando uma pendente entre 1,5% e 2,5%), contrariamente ao que acontecia na deposição de polpa. O espessamento continuou, desde então, a integrar o processo que leva o rejeitado desde o fim do beneficiamento até à sua deposição na barragem.

Posteriormente, esgotada a capacidade do enchimento por células, procedeu-se a um alteamento por método de montante, com pequenos diques e subsequentes coberturas em escombros. O escombros do dique e a deposição ficariam então assentes em rejeitado já depositado, com sucessivos perímetros de escombros (dique e cobertura) em direção ao interior do depósito. É esperado que, quando o encerramento da exploração, a barragem contemple 13 níveis de alteamentos a montante (Figura 3).

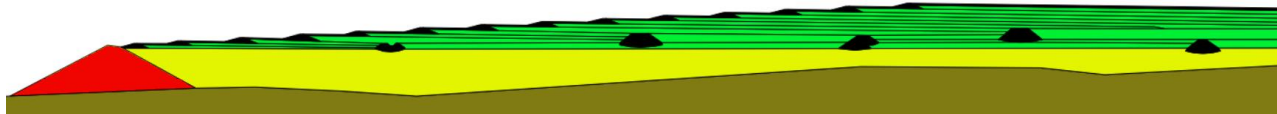


Figura 3. Secção da Barragem de Rejeitados em estudo. É possível verificar as três fases – deposição em polpa, por células e pelo método de montante.

## 2.2 Caracterização do Material e dos Solos

A secção de estudo é uma das maiores e mais desfavoráveis secções da barragem e, simultaneamente, representativa de todas as fases de expansão – começa pelo dique de partida, que suporta o rejeitado em polpa, progredindo em altura pelo método de montante, submergindo as células. O terreno natural, de comportamento drenado, com pendente tendencialmente para jusante, é bastante competente, como é possível observar no Quadro 1, de caracterização e parametrização dos materiais e solos da secção em questão (o quadro inclui previamente a indicação do modelo constitutivo usado na modelação).

Quadro 1. Parametrização dos Materiais da Barragem de Rejeitados

Material	Modelo	Drenagem	Peso Vol Sat [kN/m <sup>3</sup> ]	E [kPa]	$\nu$	$c'$ [kPa]	$\phi$ [°]	$s_{u,ref}$ [kPa]	$s_{u,inc}$ [kPa/m]	$k_x = k_y$ [m/s]
Terreno Natural	MC	D	25	500E3	0,2	16,7	36	-	-	10 <sup>-8</sup>
							<11m -> 29			
Dique	MC	D	21,5	80E3	0,3	0	11m-22m -> 28	-	-	10 <sup>-5</sup>
							22m-44m -> 26			
Escombros	MC	D	21,5	80E3	0,3	0	28	-	-	10 <sup>-5</sup>
Pasta	MC	UD	23	50E3	0,4	-	27	0	2,62	10 <sup>-7</sup>
Polpa	MC	UD	23	20E3	0,4	-	27	0	2,096	10 <sup>-8</sup>

### 3 MODELAÇÃO

Como mostrado no quadro anterior, o modelo constitutivo utilizado para a representação de todos os materiais foi o Mohr-Coulomb. Importa lembrar que este modelo, por si só, não é capaz de reproduzir a transição para um comportamento friccional com resistência residual, após ultrapassada a resistência de pico e atingida a plastificação. Uma forma de atender idealmente a esta preocupação seria a atualização manual, faseada e localizada das propriedades do material (especificamente a resistência não drenada) na medida da evidência da sua plastificação – estado de pós cedência. Em vez disso, também poderiam ser adotados modelos avançados que preveem a integração deste fenômeno, como o NorSand, ou de modelos mais simples, como o Strain-Softning. Ainda assim, a estrita utilização do modelo Mohr-Coulomb permite, a par com a análise dos deslocamentos em cada fase, uma suficiente aproximação (para o propósito) ao comportamento dos rejeitados e do corpo da barragem.

O modo como são definidas a resistência e a dissipação das poropressões e a sua evolução em profundidade, que têm elevada influência na estabilidade, foi o foco deste trabalho. Além disto, a modelação exigiu o atendimento de algumas particularidades relacionadas com o software utilizado, PLAXIS, nomeadamente a definição de uma camada de ajuda numérica, de elevada resistência. Deste modo, evitou-se a interrupção do cálculo por motivos de deslocamentos elevados, aquando da simulação da colocação do escombros. Estes deslocamentos devem ser acautelados numericamente pois, na realidade, é um processo feito progressivamente e sobre a camada superficial de rejeitado, parcialmente sobreconsolidada. Não sendo este o objeto de estudo, o emprego de camada numérica resistente serviu o propósito do trabalho.

O ponto de partida da simulação utilizado, o estado inicial, em “Gravity Loading” (como é sugerível para casos de camadas não horizontais), foi a fase final da deposição em polpa, antes da deposição por células. As fases subsequentes, de alteamentos com diques em escombros, seguidos de deposição e então da construção das coberturas, também em escombros, foram cada uma dividida em duas. A primeira subfase consiste no carregamento (por construção ou deposição), essencialmente em regime não drenado (“Plastic”), de modo instantâneo, originando excessos de poropressão; a segunda fase, por sua vez, visa atender ao ganho de resistência com o tempo, relacionado com a dissipação dos excessos de poropressão, sendo então ajustado um período para consolidação, de acordo com o ritmo real dos trabalhos. Contrariamente ao que possa parecer lógico, a substituição destas duas fases por uma de fluxo acoplado (“Fully Coupled”) não contribui para a maior precisão do modelo, mas, em vez disso, gera gradientes hidráulicos ascendentes que provocam o empolamento do material.

Para avaliar a influência do modo de definição do material e, por conseguinte, da distribuição e dissipação da poropressão e seus excessos, foram estabelecidos 3 cenários de parametrização. O primeiro cenário, mais simples, consistiu na caracterização dos rejeitados com evolução da resistência não drenada em profundidade, tendo como cota de referência a cota de deposição inicial (para cada camada); a imprecisão deste cenário consta na não atualização da mesma resistência com o estado de tensão efetivo, por exemplo nas zonas que ficariam submersas por camadas de rejeitado espessado de fases seguintes, não se traduzindo a dissipação dos excessos de poropressão num proporcional ganho de resistência. O segundo modelo procura contornar a dificuldade de, em ambiente PLAXIS, estabelecer interdependência da resistência não drenada com o estado de tensão efetivo; isto é feito pela definição da resistência segundo o tipo A, com indicação do ângulo de atrito, obrigando assim à sua evolução conforme o estado imposto pelos sucessivos alteamentos, acompanhados da subida do nível de água. O terceiro modelo (Figura 4), mais trabalhoso, consistiu em subdividir todas as camadas horizontais em camadas verticais cuja evolução do estado de tensão efetivo no tempo fosse semelhante, associando a resistência não drenada à cota de superfície em cada instante, alterando-a manualmente a cada fase em que fosse afetada.

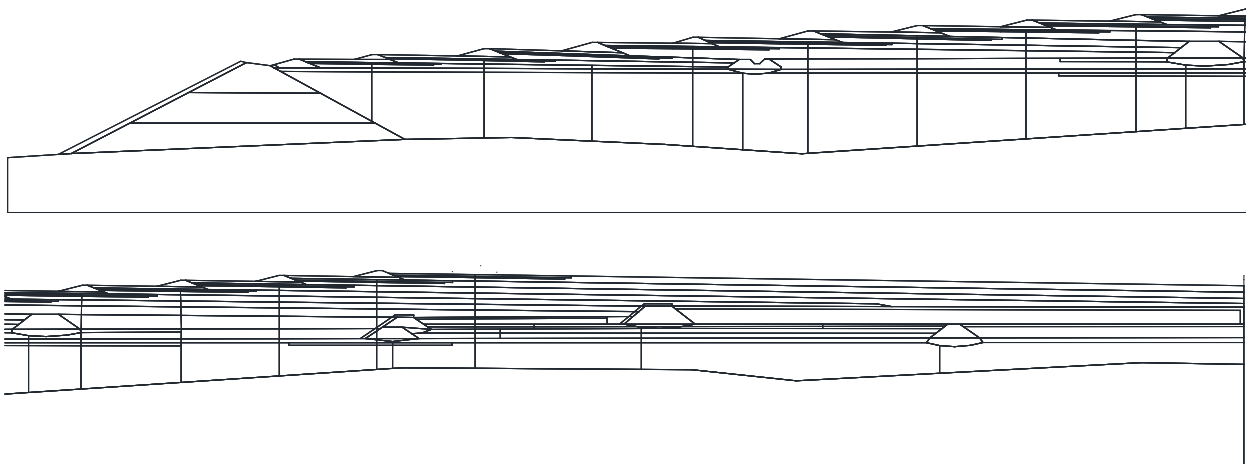


Figura 4. Divisão das Camadas da Secção segundo Diferentes Tensões Efetivas.

#### 4 RESULTADOS

Como esperado, o primeiro cenário encerrou com uma rotura precoce, no momento do carregamento do oitavo dique, com a rotura localizada na interface polpa-rejeitado espessado (fator de segurança inferior a 1,0 e deslocamentos máximos na ordem dos 110 mm, que pode indicar liquefação), como é possível verificar na Figura 5. Isto sucede por se concentrarem pontos de baixa resistência na superfície da polpa, uma vez que foi referenciada à cota de superfície do estado inicial.

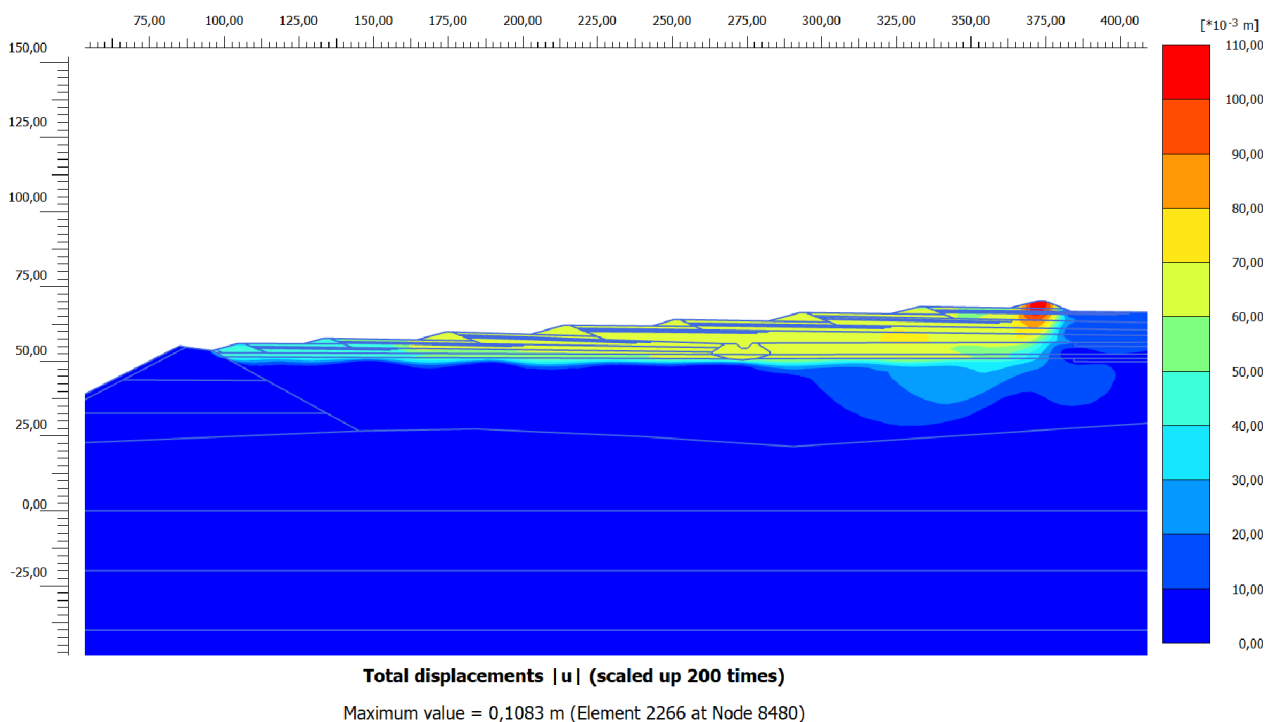


Figura 5. Deslocamentos Totais na Fase de Rotura para o modelo sem atualização da resistência não drenada com a tensão efetiva

Nos segundo e terceiro cenários os alteamentos foram sendo acomodados até à fase de encerramento, com estabilidade validada pelo cálculo numérico – fator de segurança de 1,38, para um mecanismo de rotura

na face jusante do dique de partida. Em ambos os cenários, quer a distribuição dos deslocamentos em profundidade e em planta, quer o valor máximo de deslocamentos (na ordem dos 3 cm) são muito idênticos, como pode ser visualizado na Figura 6.

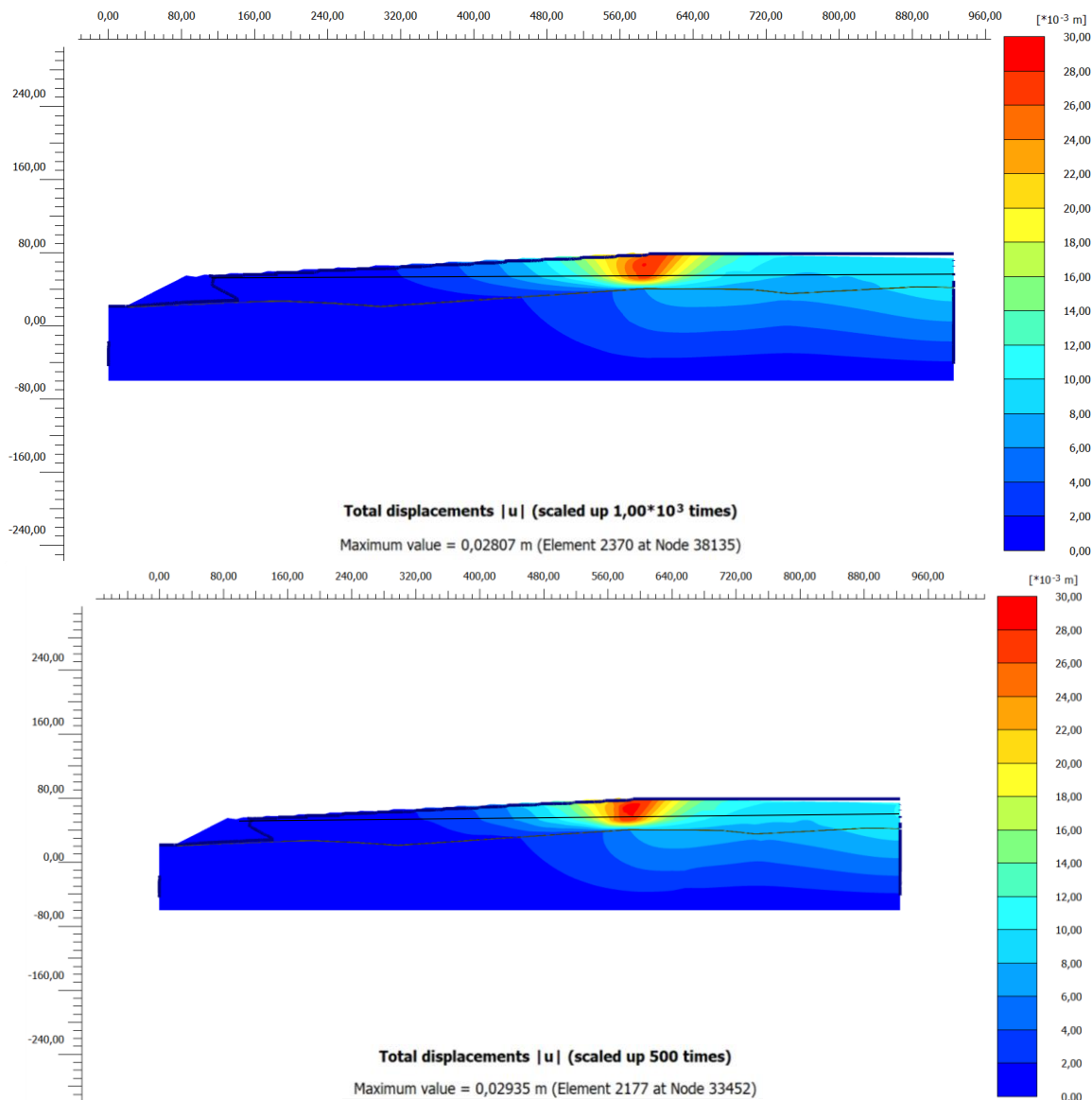


Figura 6. Deslocamentos na Análise da Fase de Encerramento da Secção da Barragem de Rejeitados para os modelos com atualização da resistência não drenada segundo a tensão efetiva pelo método não drenado tipo A (em cima) e pelo método de atualização manual da resistência (em baixo).

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho permite afirmar a importância da modelação na avaliação das condições de estabilidade das estruturas geotécnicas essenciais à prática da indústria mineira, porém, quando não dominadas as especificidades e o processo numérico, particulares para cada software e método utilizado, os cálculos podem induzir em erro, favorável ou negativamente. Os resultados obtidos respondem à proposição inicial, tendo sido obtidos dados convergentes que poderão indicar a coerência e a validade do modo de definição da resistência, dependente da dissipação dos excessos poropressão na fase de consolidação (cenários 2 e 3).

## AGRADECIMENTOS

Um agradecimento a todos os que disponibilizaram os dados que serviram de base a este estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque Filho, L. H. (2004). *Avaliação do Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeitos de Minério De Ferro através de Ensaios de Piezocone*. Pós-Graduação, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
- Been, K. (1999). *The critical state line and its application to soil liquefaction*. P. V. Lade, & J. A. Yamamuro, Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, 1999, pp. 195- 204, Balkema, Rotterdam.
- Carneiro, J. (2021). *Characterization of iron ore tailings and evaluation of the effect of compaction and confining pressures on its behaviour*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa.
- ICOLD (International Commission on Large Dams) (2011). *Improving Tailings Dam Safety - Critical Aspects of Management, Design, Operation and Closure*. Institution of Civil Engineering, Paris.
- Luz, A. B; Lins, F. A. F. (2010). Introdução ao Tratamento de Minérios. In *Tratamento de minérios*, pág. 3-20, CETEM/MCT, Rio de Janeiro.
- Mogami T. & Kubo K. (1953). *The behaviour of soil during vibration*. Proceedings of the third international conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 1953, pág. 152- 155, Suíça.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 22/julho/2007, pág. 847-852, CERENA - Centro de Recursos Naturais e Ambiente do IST, Lisboa.
- Russo, F. (2007). *Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Brasília.
- Schofield, A., Wroth, C. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. London.
- Vasconcelos, B. (2023). *Aplicação De Modelos Constitutivos Baseados Na Mecânica Dos Estados Críticos Para Análise De Estabilidade De Barragens De Rejeitados*. Simulação Numérica Pelo Método De Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://hdl.handle.net/10216/151839>
- Viana da Fonseca, A. (2012). *Application of in situ testing in tailing dams, emphasis on liquefaction: case-history*. Workshop on Practical Applications in ISC'4. Geotechnical and Geophysical Site Characetrization, 1 (181-203), CRC, Taylor & Francis, London, UK.
- Vick, S. G. (1983). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. Wiley.