



Colapso da Barragem de Rejeitos de Mount Polley: Modelagem Numérica e Lições Aprendidas

Jessica Buzolo Câmara

Mestranda, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, jessicacamaraf@discente.ufg.br

Maria Tâmara de Moraes Guimarães Silva

Professora, Instituto Federal de Goiás, Anápolis, Brasil, tamara.moraes@ifg.edu.br

Vanessa Fernandes Machado

Mestranda, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, vanessa.machado@discente.ufg.br

Gilson de F. N. Gitirana Jr.

Professor Titular, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, gilsongitirana@ufg.br

RESUMO: Este estudo aborda o colapso da barragem de rejeitos da Mina Mount Polley, considerado o maior desastre ambiental na história da mineração do Canadá. As investigações conduzidas pelo Painel Independente de Revisão (IRP), Knight Piésold/KCB e Zabolotnii (2020) indicaram que a ruptura foi causada por uma falha rotacional-translacional passando pela camada de argila glaciolacustre, cuja natureza contrátil sob carregamento comprometeu a estabilidade do maciço. Fatores como projeto deficiente, manutenção inadequada e fator de segurança insuficiente facilitaram o colapso. Este trabalho realizou novas análises de estabilidade utilizando o software PLAXIS LE, com métodos de equilíbrio limite 2D e 3D, variando as técnicas de busca da superfície crítica e os métodos de cálculo do fator de segurança. As análises 2D indicaram fatores entre 0,902 e 1,209 enquanto as 3D resultaram em valores mais altos, próximos aos obtidos pelo IRP, destacando o impacto dos efeitos tridimensionais. A geometria modificada proposta pelo IRP, com inclinação 2H:1V no talude de jusante, elevou o fator de segurança a 1,3, sugerindo que tal intervenção poderia ter evitado o colapso. O estudo ressalta a importância de identificar camadas frágeis e considerar efeitos 3D além de reforçarem a necessidade de projetos mais robustos e maior rigor no monitoramento e regulamentação de barragens.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Barragem de Rejeitos, Análise Geotécnica, Fator de Segurança, Modelagem Numérica.

ABSTRACT: This study reviews the collapse of the Mount Polley Mine tailings dam, considered the largest environmental disaster in Canadian mining history. Investigations conducted by the Independent Review Panel (IRP), Knight Piésold/KCB, and Zabolotnii (2020) indicated that the rupture was caused by a rotational-translational failure passing through the glaciolacustrine clay layer, whose contractile nature under loading compromised the stability of the massif. Factors such as poor design, inadequate maintenance, and insufficient safety factor facilitated the collapse. This work performed new stability analyses using PLAXIS LE software, with 2D and 3D limit equilibrium methods varying the critical surface search techniques and safety factor calculation methods. The 2D analyses indicated factors between 0.902 and 1.209, while the 3D analyses resulted in higher values, close to those obtained by the IRP, highlighting the impact of three-dimensional effects. The modified geometry proposed by the IRP, with a 2H:1V slope on the downstream slope, raised the safety factor to 1.3, suggesting that such intervention could have prevented the collapse. The study highlights the importance of identifying fragile layers and considering 3D effects, in addition to reinforcing the need for more robust designs and greater rigor in the monitoring and regulation of dams.

KEYWORDS: Slope Stability, Tailings Dam, Geotechnical Analysis, Safety Factor, Numerical Modeling.



1 INTRODUÇÃO

Em 4 de agosto de 2014, a barragem de rejeitos da Mina Mount Polley, na Colúmbia Britânica (Canadá), rompeu-se de forma catastrófica, liberando cerca de 25 milhões de metros cúbicos de rejeitos. De 1996 a 2014, a estrutura passou por elevações incrementais motivadas por demandas operacionais imediatas, mas realizadas sem uma compreensão abrangente do comportamento dos materiais de fundação. Esse aspecto contribui diretamente para a falha no Aterro Perimetral, onde uma camada de argila glaciolacustre (GLU) sofreu perda progressiva de resistência sob carregamento contínuo, levando à ruptura. As investigações conduzidas por Painéis de Revisão Independente (IRP) e pela consultoria Klohn Crippen Berger (KCB) identificaram falhas críticas no projeto, como a não consideração adequada das condições geológicas da fundação, a adoção de um fator de segurança insuficiente (1,3 em vez de 1,5) e possíveis deficiências na manutenção e no monitoramento, com alertas já registrados em relatório de 2010 (ZABOLOTNII, 2020).

Como consequência, o rompimento da barragem de Mount Polley causou impactos ambientais significativos e serviu como um alerta contundente para o setor de mineração, destacando a necessidade de investigações mais detalhadas da fundação, com ênfase na natureza tridimensional da estabilidade de taludes, além de planejamento de longo prazo que incorpore avaliações de risco abrangentes, estratégias de mitigação eficazes e o fortalecimento dos mecanismos regulatórios. A ruptura também despertou atenção para as limitações das metodologias tradicionais de análise, especialmente em contextos onde camadas de solo com tendência à contração sob cisalhamento que podem comprometer a estabilidade global da estrutura.

Este artigo revisita as análises conduzidas pelo IRP (2015), KCB (2015) e Zabolotnii (2020), reproduzindo seus estudos de estabilidade para comparar os fatores de segurança obtidos com aqueles calculados neste trabalho, utilizando diferentes métodos de cálculo e busca de superfície crítica. Também são avaliadas as diferenças entre os fatores de segurança não drenados de pico e pós-pico, com o objetivo de identificar qual representa melhor as condições do campo no momento da ruptura, além da comparação entre modelagens 2D e 3D e da proposição de ajustes no projeto que elevem o fator de segurança aos níveis atualmente recomendados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A barragem de rejeitos de Mount Polley foi concebida e operada pela Mount Polley Mining Corporation (MPMC) (ZABOLOTNII, 2020), com participação de diversas empresas de engenharia em diferentes estágios do projeto. A fiscalização e revisão do projeto foram de responsabilidade do Ministério de Energia e Minas da Colúmbia Britânica, que realizou inspeções de segurança ao longo de toda a operação (IRP, 2015; KCB, 2015; ZABOLOTNII, 2020).

Após a ruptura em 2014, duas investigações independentes foram conduzidas: o Painel Independente de Revisão (IRP, 2015) e a consultoria Klohn Crippen Berger (KCB, 2015). O IRP concluiu que a falha foi causada por cisalhamento não drenado na camada de argila glaciolacustrina (Upper GLU), cuja resistência foi superestimada. A barragem teria cedido sob tensões elevadas devido à elevação incremental da estrutura, falhas de projeto e na investigação geotécnica.

A KCB reconheceu a presença da GLU, mas argumentou que a resistência de pico da fundação seria suficiente, atribuindo a instabilidade à geometria da barragem e à recarga hídrica. No entanto, simulações numéricas realizadas por Zabolotnii (2020), em 2D e 3D, com base nos modelos do IRP e da KCB, mostraram que a ruptura só pode ser reproduzida com parâmetros pós-pico ou residuais. A autora defende que o enfraquecimento progressivo do solo e a resistência reduzida da GLU foram decisivos para o colapso, reforçando a interpretação do IRP e refutando a hipótese da KCB.

Zabolotnii (2020) também destacou a importância de análises tridimensionais, que capturam a mobilização de resistência nas bordas do maciço, mostrando que abordagens exclusivamente bidimensionais podem superestimar a estabilidade. O Quadro 1 resume os principais aspectos das análises realizadas pelos três estudos que avaliaram a ruptura da barragem de Mount Polley.



Quadro 1. Comparativo de Análises: IRP, KCB e modelagem Numérica de Zabolotnii.

Aspecto	IRP (2015)	KCB (2015)	Zabolotnii (2020)
Objetivo da análise	Determinar a causa da falha	Avaliar cenários de estabilidade (pico, residual, sísmico e pós-terremoto)	Replicar os modelos do IRP e da KCB para testar hipóteses e avaliar efeitos tridimensionais
Método utilizado	Equilíbrio limite 2D (Morgenstern-Price via Plaxis LE e SLOPE/W)	Equilíbrio limite 2D com variação de resistência e cenários sísmicos (SLOPE/W)	Equilíbrio limite 2D e 3D (Soil Vision/FLAC3D); também realizou análise de deformação
Hipótese principal	Falha por cisalhamento não drenado na Upper GLU com resistência reduzida	Resistência de pico era suficiente; falha atribuída a geometria e recarga	Enfraquecimento progressivo necessário; resistência de pico não explica a falha em 3D
Tipo de resistência avaliada	Não drenada (valores médios e residuais)	Resistência de pico, residual e sob liquefação	Pico, pós-pico e residual para ambas as réplicas (IRP e KCB)
Fator de segurança (FOS)	$FOS \approx 1,3$ (com resistência $s_u = 0,22\sigma'_{vc}$)	FOS 1,3 (pico) / 1,2–1,25 (pós-pico) / ~1,0 (residual), dependendo do cenário	FOS 1,18 (pós-pico) / 1,02–1,03 (residual); falha apenas com resistência residual
Conclusão principal	Falha ocorreu com resistência um pouco abaixo da de pico	Resistência de pico atuava na falha; instabilidade causada por geometria e recarga	Falha apenas com resistência residual, apoiando IRP e refutando a suposição da KCB

3 METODOLOGIA

As análises de estabilidade foram conduzidas utilizando o software PLAXIS LE (Equilíbrio Limite), empregando o módulo "slope stability" com o objetivo de replicar e comparar os resultados de investigações anteriores. Realizou-se uma análise combinando diferentes modelos de cálculo e métodos de busca de superfície crítica, o que permitiu explorar diferentes premissas no cálculo da estabilidade e identificar possíveis variações nos valores de FS para cada condição estudada. Dentre as análises publicadas após a ruptura, cada autor adotou uma geometria para as análises numéricas do Fator de Segurança, que por sua vez, foram replicadas neste trabalho utilizando o software Plaxis LE 2D e 3D.

O IRP considerou uma razão de resistência não drenada de 0,27 para o lençol freático alto, condição observada em julho de 2014, quando o nível de água se deslocava horizontalmente pela praia de rejeitos. Para o lençol freático baixo, foi adotada uma razão de resistência não drenada de 0,22, com a pressão da água reduzida no núcleo da barragem devido à drenagem na face montante. Além disso, o órgão avaliou o abatimento do talude de jusante de 1.3H:1V para 2H:1V e neste estudo buscou-se reproduzir esta análise no software Plaxis LE.

A fim de analisar o Fator de Segurança obtido pelo KCB (2015), reproduziu-se o modelo 2D apresentado no relatório do órgão que por sua vez, apresenta apenas o FS da condição drenada o que restringiu a análise aqui descrita à mesma condição. Para as análises não drenadas, utilizou-se a geometria simplificada do modelo desenvolvido por Zabolotnii (2020) associado aos parâmetros encontrados no relatório do KCB (2015).

A geometria desenvolvida por Zabolotnii (2020) e a linha freática também foram replicadas, considerando algumas simplificações, como a geometria da Upper GLU, a qual foi adotada como formato de "panqueca" pela autora e, neste trabalho, estende-se por toda a barragem. Já para a análise 3D de estabilidade utilizou-se uma geometria simplificada a partir da geometria desenvolvida por Zabolotnii (2020).

Para a reprodução dos modelos criou-se uma sigla para cada investigador, em que seria possível identificar a geometria e os parâmetros adotados na análise de estabilidade. A Tabela 1 apresenta as relações.

Tabela 1. Nomenclatura adotada para identificação dos modelos utilizados.

Sigla	Geometria	Parâmetros de entrada
IRP (2015)	Relatório oficial IRP (2015)	Relatório oficial IRP (2015)
IRP_ADP (2015)	Relatório oficial IRP (2015)	Coletados por Zabolotnii (2020)
EL_IRP (2020)	Tese Zabolotnii (2020)	Coletados por Zabolotnii (2020)
KCB (2015)	Relatório oficial KCB (2015)	Relatório oficial KCB (2015)
KCB_ADP (2020)	Relatório oficial KCB (2015)	Coletados por Zabolotnii (2020)
EL_KCB (2020)	Tese Zabolotnii (2020)	Coletados por Zabolotnii (2020)



Os parâmetros de entrada utilizados por cada investigador em cada camada estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de entrada no software.

Material	Propriedade	Fonte					
		IRP (2015)	IRP_AP (2015)	EL_IRP (2020)	KCB (2015)*	KCB_AP (2020)	EL_KCB (2020)
Rejeitos (<i>Tailings</i>)	γ (kN/m ³)	18,0	18,6	18,6	18,0	18,1	18,1
	Modelo de resistência	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
	ϕ (°)	30	30	30	30	28-32	28
Núcleo (<i>Core</i>)	c (kPa)	0	0	0	0	0	20
	γ (kN/m ³)	20,5	20,5	22,8	20,5	22,8	22,8
	Modelo de resistência	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Material Glacial (<i>Upper Till</i>)	ϕ (°)	35	35	35	33	33	35
	c (kPa)	0	0	0	0	0	0
	γ (kN/m ³)	21,0	21,6	21,6	21,0	22,7	22,7
Enrocamento (<i>Rockfill</i>)	Modelo de resistência	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
	ϕ (°)	35	35	35	33	33/35	35
	c (kPa)	0	0	0	0	0	0
Enrocamento (<i>Rockfill</i>)	γ (kN/m ³)	22,0	22,8	22,8	22,0	20,4	22,8
	Modelo de resistência	Shear-normal fn.	Shear-normal fn.	Marsal (1973) Amostra 1	Marsal (1973)**	Mohr-Coulomb	Marsal (1973) Amostra 1
	ϕ (°)	-	-	-	-	40	-
Argila Glacioclastária (<i>Upper GLU</i>)	c (kPa)	-	-	-	-	0	-
	γ (kN/m ³)	20,0	20	18,6	20,0	18,6	18,6
	Modelo de resistência	Undrained Strength Ratio	Undrained Strength Ratio	s_u/σ'_{ov}	Mohr-Coulomb (pico)	$s_u = \sigma'_{cv} * 47,5 + 47,5$ (kPa)	Undrained Strength Ratio
Depósitos glaciais (<i>Lower Tills</i>)	ϕ (°)	0,22	0,22	0,18	-	-	0,22
	γ (kN/m ³)	-	-	-	26	-	-
	Modelo de resistência	Bedrock	-	-	-	-	-
Leito rochoso (<i>Bedrock</i>)	γ (kN/m ³)	-	-	-	-	23/17,9	-
	Modelo de resistência	Bedrock	Bedrock	Bedrock	Bedrock	Mohr-Coulomb	Bedrock

onde: γ : Peso específico; ϕ : Ângulo de atrito e c : coesão

* Dados **drenados** extraídos do relatório KCB (2015)

** Optou-se por utilizar os dados publicados por Marsal (1973) para representar o comportamento do enrocamento

Diversos tipos de busca de superfície constam no software *Plaxis LE*, entretanto, optou-se por utilizar os modos de Entrada e saída (*Entry and Exit*) e Grid e Tangente (*Grid and Tangent*), que foram os utilizados pelo IRP (2015) e Zabolotnii (2020). Adicionalmente, utilizou-se o método “*Cuckoo Search*” com intuito de avaliar a diferença de valores de fator de segurança (FS) obtidos por diferentes métodos de busca. Para o cálculo de fator de segurança, utilizou-se o método de Morgenstern-Price (M-P), que foi utilizado pelo IRP (2015), KCB (2015) e Zabolotnii (2020), analisando também pelos métodos Bishop Simplificado e GLE a fim de analisar a variação do FS.



4 RESULTADOS

Todas as análises de estabilidade foram desenvolvidas considerando geometrias e parâmetros apresentados anteriormente nas Tabelas 1 e 2, calculando o fator de segurança pelos métodos de cálculo e de busca de superfícies citados.

4.1 Análise Bidimensional

4.1.1 Análise de Tendência

A partir das análises dos fatores de segurança com diferentes métodos, elaborou-se gráficos para avaliar a dispersão dos valores. Consideraram-se razões de resistência não drenada de 0,22 e 0,27, tomando como referência os valores reportados no relatório oficial da ruptura da barragem de Mount Polley (IRP, 2015). Os FS correspondentes foram 1,002 e 0,991, respectivamente, os quais foram adotados como valores de referência e denominados neste estudo como “FS alvo”. A Figura 1 apresenta o gráfico de tendência correspondente as razões de resistência não drenada.

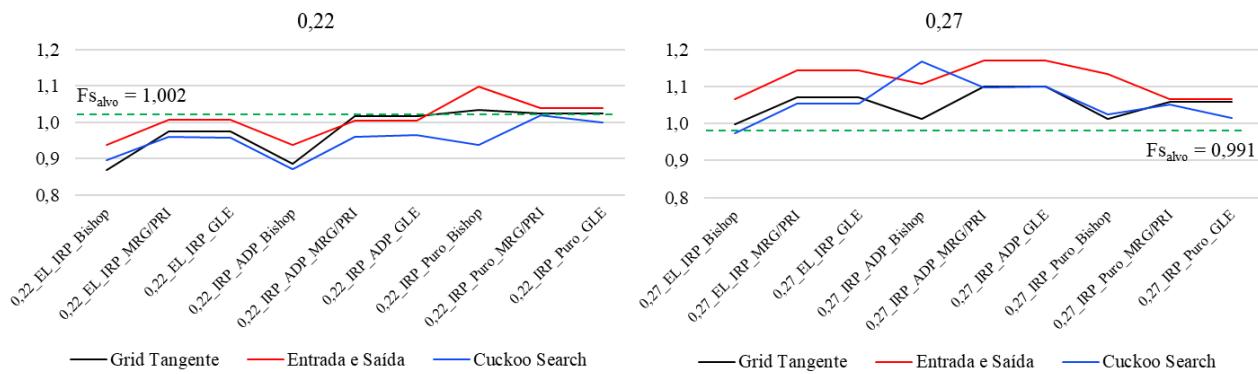


Figura 1. Gráfico de tendência para razão não drenada de 0,22 e 0,27.

A análise das tendências para as relações não drenadas de 0,22 e 0,27 revela comportamento consistente dos fatores de segurança (FS) conforme o Fator de Segurança alvo. Para 0,22, os métodos apresentam FS próximos de 1,00, representados na Figura 1 por linhas verdes tracejadas.

Os métodos Grid Tangente e Entrada e Saída demonstraram maior alinhamento com o FS alvo, enquanto o Cuckoo Search apresentou valores inferiores, mas aceitáveis. Para 0,27, há aumento nos valores de FS, indicando maior segurança. O método Entrada e Saída mantém-se conservador, com FS superiores a 1, enquanto o Cuckoo Search alcança valores próximos do FS alvo em modelos IPR_ADP e IPR_(2015) para Morgenstern-Price. Em ambas relações não drenadas, os métodos se mostram adequados, com diferenças dentro da normalidade para análises de estabilidade.

4.1.2 Análise comparativa

A Tabela 3 mostra uma comparação entre os valores de FS obtidos para os métodos de busca de superfície crítica (Grid Tangente, Entrada e Saída e Cuckoo Search) considerando os três modelos de cálculo (Bishop, Morgenstern-Price e GLE) variando as relações não drenadas de 0,22 e 0,27. Os resultados obtidos utilizaram os modelos: IPR (2015) em que a geometria e os parâmetros de entrada foram obtidos do relatório oficial do IPR, IPR_ADP com a geometria do relatório e com os dados apresentados por Zabolotnii (2020) e EL_IPR com a geometria e parâmetros apresentados na análise de Zabolotnii (2020).



Tabela 3. Comparação dos resultados de FS entre IRP (2015), IRP ADP e EL IRP

GRID TANGENTE	IRP (2015)	IRP ADP	EL IRP (2020)
Bishop	1,034	1,006	0,994
MRG/PRI	0,22	1,025	0,983
GLE	1,025	0,983	0,971
Bishop	1,013	1,013	0,998
MRG/PRI	0,27	1,059	1,101
GLE	1,059	1,101	1,072
ENTRADA E SAÍDA	IRP (2015)	IRP ADP	EL IRP (2020)
Bishop	1,097	1,101	1,081
MRG/PRI	0,22	1,039	1,065
GLE	1,039	1,065	1,049
Bishop	1,187	1,113	1,193
MRG/PRI	0,27	1,139	1,209
GLE	1,139	1,208	1,138
CUCKOO SEARCH	IRP (2015)	IRP ADP	EL IRP (2020)
Bishop	0,937	0,902	0,897
MRG/PRI	0,22	1,019	0,979
GLE	0,999	0,980	0,957
Bishop	1,015	0,997	0,973
MRG/PRI	0,27	1,050	1,088
GLE	1,051	1,090	1,055

Observou-se boa concordância entre os fatores de segurança obtidos para ambas as relações não drenadas (0,22 e 0,27), com variações inferiores a 10% entre os modelos IRP (2015), IRP_ADP e EL_IRP. Os resultados mantiveram-se consistentes independentemente do método de cálculo ou de busca de superfície crítica adotada, indicando robustez nas análises.

Em seguida, foram realizadas análises baseadas na geometria utilizada pela KCB com os dados obtidos por Zabolotinii (2020) nomeada por KCB_ADP e com a geometria desenvolvida pela autora e com os parâmetros coletados por Zabolotinii (2020) do relatório da KCB, sendo aqui nomeada por EL_KCB.

As verificações do cálculo de estabilidade podem ser observadas na Tabela 4 e indicaram fatores de segurança com algumas discrepâncias entre as análises dos modelos KCB_ADP e EL_KCB em relação aos obtidos pelo IRP_(2015). As diferenças também não foram consideradas significativas e foram consideradas satisfatórias e dentro da normalidade em análises de estabilidade de taludes.

4.1.3 Análise do KCB (2015) na condição drenada

Utilizando-se do modelo bidimensional desenvolvido pela KCB (2015) para a condição drenada associado ao método de busca de superfície de Grid e Tangente obteve-se um FS de 1,369 para o método de cálculo de Morgenstern-Price e GLE e um FS de 1,375 para Bishop. Valores estes que apresentaram uma variação menor que 3% de desvio em relação ao fator de segurança encontrado pelo KCB (2015) de 1,338.

4.1.4 Alteração de geometria proposta pelo IRP (2015)

Da reprodução do modelo do IRP (2015) para talude de jusante de 2H:1V, encontrou-se um valor de FS de 1,270, sendo este 0,63% menor do que o encontrado no relatório. Isso indica que, caso a inclinação tivesse sido suavizada com o alargamento da crista, o FS teria alcançado 1,278, valor próximo ao mínimo exigido de 1,3, possivelmente evitando a falha do aterro. Segundo o IRP (2015), a inclinação de 2H:1V era necessária, em qualquer caso, para dar suporte aos critérios de recuperação e fechamento.



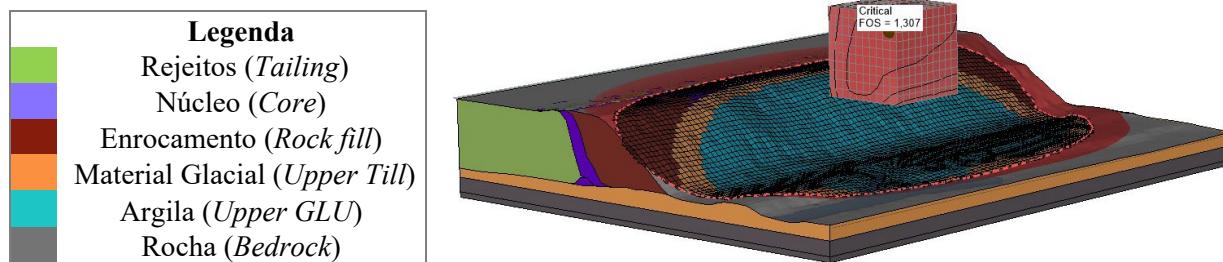
Tabela 4. Comparação dos resultados de FS entre KCB ADP e EL_KCB

GRID TANGENTE	KCB_ADP	EL_KCB
Bishop	0,754	0,809
MRG/PRI	0,18	0,875
GLE	0,983	0,892
Bishop	0,951	0,988
MRG/PRI	0,27	1,052
GLE	1,052	1,093
ENTRADA E SAÍDA	KCB_ADP	EL_KCB
Bishop	0,807	0,849
MRG/PRI	0,22	0,879
GLE	0,879	0,910
Bishop	1,025	1,075
MRG/PRI	0,27	1,118
GLE	1,118	1,163
CUCKOO SEARCH	KCB_ADP	EL_KCB
Bishop	0,754	0,843
MRG/PRI	0,22	0,870
GLE	0,860	0,878
Bishop	0,957	0,978
MRG/PRI	0,27	1,049
GLE	1,052	1,062

4.2 Análise Tridimensional

Analisou-se os fatores de segurança 3D usando a geometria baseada no modelo 2D do IRP (2015), com simplificações e os parâmetros do IRP (2015), KCB (2015) e Zabolotnii (2020). O modelo desenvolvido com o fator de segurança encontrado na combinação do método de Grid e Tangente com Morgenstern-Price é apresentado na Figura 2.

Figura 2. Análise tridimensional com parâmetros do IRP (2015)



A Tabela 5 compara os Fatores de Segurança das análises 2D e 3D pelo método de Grid e Tangente com Morgenstern-Price.

Tabela 5. Fatores de segurança da análise 2D e 3D para a condição de pico não drenada (razão de 0,27)

Análise	IRP (2015)	IRP_ADP (2015)¹	KCB_ADP (2015)¹	IRP (2015)²
2D	1,002	1,021	1,140	1,053
3D	1,288	-	1,310	1,307

¹ Valores extraídos por Zabolotnii (2020)

² Valores extraídos do IRP (2015) associado à geometria de Zabolotnii (2020)



Nas análises 2D, observou-se variação entre os modelos, com valores de 1,002 (IRP, 2015) a 1,140 (KCB_AdP (2015)). As modificações por KCB e análises do IRP aumentaram os fatores de segurança em relação ao cenário original. Nas análises 3D, os valores variam de 1,288 (IRP, 2015) a 1,310 (KCB_AdP (2015)), com diferença de 1,7%. A análise 3D apresentou menor dispersão de resultados, demonstrando robustez em capturar condições tridimensionais apesar de exigir malhas detalhadas, maior processamento e validação mais complexa. As análises 2D, apesar de maior variação e sensibilidade, podem ser mais conservadoras. Comparando os resultados de FS obtidos encontrou-se um desvio de 5% para a análise 2D e de apenas 1% para a análise 3D sendo as diferenças consideradas satisfatórias e dentro da normalidade para análises de estabilidade de taludes.

Vale ressaltar que a escolha entre análises 2D e 3D requer julgamento de engenharia apropriado. A abordagem 2D é adequada quando uma das dimensões possui grande desenvolvimento geométrico e não influencia significativamente a seção em estudo, enquanto a 3D torna-se mais representativa em cenários com variações relevantes em todas as direções. Em ambos os casos, a confiabilidade dos resultados depende da seleção criteriosa de parâmetros, sendo a busca por representatividade essencial para evitar interpretações equivocadas quanto ao fator de segurança.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo o IRP (2015) e a KCB (2015), uma investigação geotécnica mais aprofundada da fundação poderia ter identificado previamente a presença da camada de argila glaciolacustrina de baixa resistência (Upper UGLU), permitindo um projeto mais adequado às condições do terreno, como uma fundação reforçada ou medidas de melhoria da resistência da argila. A estabilidade da barragem também poderia ser aumentada por modificações geométricas, como o abatimento do talude de jusante de 1,3H:1V para 2H:1V e o alargamento da crista, conforme simulado tanto pelo IRP quanto neste estudo, que resultaram em fatores de segurança próximos ao valor mínimo recomendado de 1,3, evitando, assim, a ruptura. Além dessas intervenções, destaca-se a técnica de empilhamento a seco como alternativa mais segura e sustentável para o armazenamento de rejeitos por meio da filtragem para transformá-los em material sólido. Essa abordagem reduz significativamente o risco de falhas, por não depender de estruturas hidráulicas, possuir menor impacto ambiental, economia de água e maior facilidade de controle dos rejeitos. Segundo IRP (2015) e KCB (2015), havia necessidade de reduzir água do depósito de rejeitos, e a técnica de pilha seca poderia ter sido implementada em Mount Polley, oferecendo alternativas mais seguras para o gerenciamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fredlund, D. G., Krahn, J. (1977) Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, 14(3), 429-439.
- Greco, V.R. (1996) Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122(7), 517-525.
- Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel (IRP). (2015) *Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach*. Government of British Columbia, 147 p.
- Crippen and Berger Klohn (KCB). (2015) Mount Polley tailings dam failure – Assessment of failure mechanism. Report no. M09954A01.730. BC Ministry of Energy and Mines, 182 p.
- Marsal, R. J. Mechanical Properties of Rockfill. 92 f. 1973.
- Morgenstern, N. R.; Price, V. E. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15(1), p. 79-93.
- Yang, X. S.; Deb, S. (2009) Cuckoo search via Lévy flights. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), IEEE Publications, 210-214.
- Zabolotnii, E. (2020) *Three-dimensional slope stability effects in the failure at the Mount Polley Tailings Storage Facility*. Tese (Doutorado em Engenharia Geotecnica) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Alberta, 580 p.