

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Pedro Moni Ribeiro Filho

**Influência do grau de compactação na estabilidade e na deformabilidade de pilhas de
rejeito filtrado de minério de ferro**

Juiz de Fora

2026

Pedro Moni Ribeiro Filho

Influência do grau de compactação na estabilidade e na deformabilidade de pilhas de rejeito filtrado de minério de ferro

Dissertação apresentada ao Programa de pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais

Orientador: Prof. Dsc. Heraldo Nunes Pitanga

Coorientadora: Profa. Dsc. Cátia de Paula Martins

Coorientador: Prof. Dsc. Mário Vicente Riccio Filho

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Moni Ribeiro Filho, Pedro.

Influência do grau de compactação na estabilidade e na deformabilidade de pilhas de rejeito filtrado de minério de ferro / Pedro Moni Ribeiro Filho. -- 2026.

122 p.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

Coorientadores: Cátia de Paula Martins, Mário Vicente Riccio Filho

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2026.

1. Rejeito de minério de ferro filtrado. 2. Pilha de rejeito de minério filtrado. 3. Grau de compactação. 4. Estabilidade geotécnica. 5. Deformabilidade. I. Nunes Pitanga, Heraldo, orient. II. de Paula Martins, Cátia, coorient. III. Riccio Filho, Mário Vicente, coorient. IV. Título.

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

PEDRO MONI RIBEIRO FILHO

Título: "INFLUÊNCIA DO GRAU DE COMPACTAÇÃO NA ESTABILIDADE E NA DEFORMABILIDADE DE PILHAS DE REJEITO FILTRADO DE MINÉRIO DE FERRO."

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 12/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Heraldo Nunes Pitanga - Orientador e Presidente da Banca - (UFJF)

Prof. Dr. Mario Vicente Riccio Filho - Coorientador - (UFJF)

Profa. Dra. Cátia de Paula Martins - Coorientadora - (UFJF)

Prof. Dr. Klaus Henrique de Paula Rodrigues - Membro Titular Externo (UFV)

Prof. Dr. José Roberto Fernandes Galindo - - Membro Titular Externo (UFRB)

Juiz de Fora, 18/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Heraldo Nunes Pitanga, Professor(a)**, em 20/02/2026, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Roberto Fernandes Galindo, Usuário Externo**, em 26/02/2026, às 14:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **KLAUS H P RODRIGUES, Usuário Externo**, em 26/02/2026, às 14:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mario Vicente Riccio Filho, Vice-Chefe de Departamento**, em 26/02/2026, às 14:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Catia de Paula Martins, Professor(a)**, em 12/03/2026, às 12:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2878081** e o código CRC **2088AC32**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus Pai, Filho e Espírito Santo, por me conceder muitas bênçãos ao longo de minha vida, além de me mostrar o caminho correto e fornecer os meios para superar todos os obstáculos nessa mesma caminhada e crescer na Fé da Santa Igreja Católica de Nosso Senhor Jesus Cristo e seus apóstolos.

Também a meus pais, que nunca mediram esforços para me proporcionar a melhor criação. Seguindo a Sagrada Família, eles são também minha fonte de inspiração e o exemplo de família que quero seguir: pai honesto, trabalhador e perseverante; mãe carinhosa, atenciosa e dedicada. Agradeço a Deus por ser filho de vocês e rezo para que possamos passar muitos anos juntos.

À minha amada irmã, grandemente virtuosa, que sempre serviu como melhor amiga e com quem sempre pude contar para qualquer situação. Agradeço a Deus por ser seu irmão e por todos os momentos juntos.

A meus avós, maternos e paternos, que sempre estimaram ver seus netos formados e realizados, e que transmitiram bons ensinamentos e experiências de vida.

A meus tios e primos, em especial a minha madrinha, que sempre me apoiaram e se interessaram por conhecer minha trajetória acadêmica, profissional e de vida.

A meus amigos, que serviram para tornar o ambiente mais tranquilo e engraçado, além de proporcionarem momentos de reflexão e formação de pensamento crítico.

Ao meu orientador, ao meu coorientador e a minha coorientadora, que contribuíram com muitos conhecimentos importantes para a minha formação como engenheiro mestre e não mediram esforços para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho. Também aos membros da banca examinadora e técnicos de laboratório, que, também, deram boas contribuições para o presente trabalho.

Por fim, agradeço novamente a Deus pela minha vida e a todos que agiram através d'Ele para fazer parte dela e me formar como homem. Agradeço por mais essa conquista.

“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.” (São Francisco de Assis).

RESUMO

A indústria de mineração possui papel relevante na economia brasileira, especialmente no setor de extração de minério de ferro, atividade que gera grandes volumes de rejeitos, os quais demandam soluções de disposição ambientalmente adequadas e geotecnicamente seguras. Nesse contexto, o empilhamento a seco com rejeitos filtrados tem se consolidado como alternativa às barragens de rejeitos convencionais, por reduzir riscos associados à liquefação e impactos ambientais. Apesar dos avanços, observa-se na literatura uma lacuna quanto à avaliação integrada e sistemática da influência do grau de compactação como variável de projeto sobre a estabilidade geotécnica e o comportamento deformacional de pilhas de rejeito de minério de ferro filtrado, especialmente considerando diferentes condições geométricas e níveis d'água. Diante disso, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar de forma comparativa e integrada a influência do grau de compactação (GC) sobre o desempenho geotécnico e o comportamento deformacional de pilhas construídas com rejeito de minério de ferro filtrado (RMFF), buscando contribuir para a definição de critérios técnicos que permitam a otimização entre segurança e custo operacional. O diferencial do estudo reside na combinação de ensaios laboratoriais de caracterização física, compactação, cisalhamento direto, adensamento edométrico e permeabilidade, realizados em corpos de prova com três diferentes graus de compactação na Energia Proctor Normal (99%, 93% e 88%) para uma massa específica aparente máxima de 2,083 g/cm³, com análises computacionais de estabilidade e deformabilidade para diferentes geometrias e condições de saturação das pilhas. Os parâmetros obtidos experimentalmente, incluindo resistência ao cisalhamento (coesão efetiva e ângulo de atrito), rigidez (módulo oedométrico) e permeabilidade (coeficiente de permeabilidade), subsidiaram simulações de estabilidade pelo método do equilíbrio limite (MEL) no *software Slide2* e método de elementos finitos (MEF) no *Plaxis 2D*, considerando diferentes inclinações de taludes (25°, 32° e 39°) e condições de nível d'água (normal e crítico). Adicionalmente, análises deformacionais foram realizadas no *Plaxis 2D*, permitindo a avaliação de deslocamentos e zonas susceptíveis à plastificação das pilhas. Os resultados indicaram que a redução do grau de compactação provoca diminuição da resistência ao cisalhamento e da rigidez do RMFF, impactando a estabilidade e aumentando os deslocamentos em até 34%, sobretudo em condições de maior inclinação e saturação. Contudo, verificou-se que graus de compactação intermediários (93% e 88%) podem apresentar fatores de segurança (FS) que superam em até 45%, em determinadas configurações de geometria e condições de nível d'água, o FS mínimo exigido pela NBR 13029, evidenciando a possibilidade de otimização do projeto

sem comprometimento da segurança. Conclui-se que o grau de compactação constitui um parâmetro determinante para o desempenho geotécnico de pilhas de RMFF, devendo ser tratado como variável estratégica de projeto, recomendando-se a realização de análises laboratoriais e numéricas integradas para cada caso específico.

Palavras-chaves: rejeito de minério de ferro filtrado; pilha de rejeito de minério filtrado; grau de compactação; estabilidade geotécnica; deformabilidade.

ABSTRACT

The mining industry plays a significant role in the Brazilian economy, especially in the iron ore extraction sector, an activity that generates large volumes of tailings, which demand environmentally sound and geotechnically safe disposal solutions. In this context, dry stacking with filtered tailings has become established as an alternative to conventional tailings dams, as it reduces risks associated with liquefaction and environmental impacts. Despite advances, a gap is observed in the literature regarding the integrated and systematic evaluation of the influence of the degree of compaction (DC) as a design variable on the geotechnical stability and deformational behavior of filtered iron ore tailings piles, especially considering different geometric conditions and water levels. Given this, the present research aims to comparatively and integrally evaluate the influence of the degree of compaction on the geotechnical performance and deformational behavior of stockpiles constructed with filtered iron ore tailings (FIOT), seeking to contribute to the definition of technical criteria that allow for optimization between safety and operational cost. The study's distinguishing feature lies in the combination of laboratory tests of physical characterization, compaction, direct shear, oedometer consolidation, and permeability, performed on specimens with three different degrees of compaction (99%, 93%, and 88%), with computational analyses of stability and deformability for different geometries and saturation conditions of the stockpiles. The experimentally obtained parameters, including shear strength (effective cohesion and friction angle), stiffness (oedometer modulus), and permeability (permeability coefficient), supported stability simulations using the limit equilibrium method (LEM) in Slide2 software and the finite element method (FEM) in Plaxis 2D, considering different slopes (25°, 32°, and 39°) and water table conditions (normal and critical). Additionally, deformational analyses were performed in Plaxis 2D, allowing the evaluation of displacements and zones susceptible to pile plasticization. The results indicated that reducing the degree of compaction causes a decrease in shear strength and stiffness of the FIOT piles, impacting stability and increasing displacements in up to 34%, especially under conditions of greater inclination and saturation. However, it was found that intermediate degrees of compaction (93% and 88%) can present factors of safety (FoS) that exceed the minimum FoS required by NBR 13029 by up to 45%, in certain geometry configurations and water level conditions, highlighting the possibility of optimizing the design without compromising safety. It is concluded that the degree of compaction is a determining parameter for the geotechnical performance of FIOT piles and should be treated as a strategic

design variable, recommending integrated laboratory and numerical analyses for each specific case.

Keywords: iron ore tailings; filtered iron ore tailings pile (dry stacking); degree of compaction; geotechnical stability; deformability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo real de pilha de rejeito de minério filtrado	27
Figura 2: Comparação entre os processos de empilhamento hidráulico e filtrado de rejeitos de mineração.....	28
Figura 3: Esquema do processo de filtragem em um filtro de correia.....	30
Figura 4: Fluxograma das etapas da metodologia	43
Figura 5: RMFF disposto em bandejas: (a) secagem ao ar e (b) destorroado	44
Figura 6: Equipamentos utilizados para: (a) peneiramento fino, (b) peneiramento grosso e (c) sedimentação	45
Figura 7: Picnômetro com amostra de RMFF em processo de retirada do ar por bomba de vácuo	46
Figura 8: Equipamentos utilizados nos ensaios de: (a) LL e (b) LP.....	46
Figura 9: Moldagem do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento direto: (a) prensa e (b) corpo de prova de RMFF moldado.....	48
Figura 10: Prensa de cisalhamento direto.....	50
Figura 11: (a) Corpo de prova de RMFF moldado para ensaio oedométrico e (b) Prensa Bishop para ensaio oedométrico	51
Figura 12: Geometria da pilha de RMFF considerada nas análises de estabilidade geotécnica	52
Figura 13: Geometria da pilha de RMFF com $I = 25^\circ$	54
Figura 14: Geometria da pilha de RMFF com $I = 39^\circ$	54
Figura 15: Geometria da pilha de RMFF.....	56
Figura 16: Condição de NA normal para análise no <i>Plaxis 2D</i>	57
Figura 17: Condição de NA crítico para análise no <i>Plaxis 2D</i>	57
Figura 18: Curva granulométrica do RMFF	59
Figura 19: Curva de compactação Proctor Normal do RMFF	60
Figura 20: Envoltória de resistência ao cisalhamento do RMFF compactado: (a) $GC_{\text{médio}} = 99\%$, (b) $GC_{\text{médio}} = 93\%$ e (c) $GC_{\text{médio}} = 88\%$,.....	65
Figura 21: Curvas de adensamento para cada GC_{real}	68
Figura 22: Curvas Tensão vertical efetiva x E_{oed} : (a) $GC_{\text{real}} = 99\%$, (b) $GC_{\text{real}} = 93\%$ e (c) $GC_{\text{real}} = 88\%$	70
Figura 23: Curvas Tensão vertical efetiva x Coeficiente de permeabilidade: (a) $GC_{\text{real}} = 99\%$, (b) $GC_{\text{real}} = 93\%$ e (c) $GC_{\text{real}} = 88\%$	71

Figura 24: Gráfico comparativo: (a) resultados das análises de primeira rodada e (b) resultados das análises de segunda rodada no <i>software Slide2</i>	76
Figura 25: FS para GC=99%, I= 32° e NA crítico.....	77
Figura 26: FS x GC em função do NA (I = 32°).....	78
Figura 27: FS x Inclinação em função do NA (GC = 99%)	79
Figura 28: Gráfico comparativo: (a) resultados das análises de deslocamentos e (b) FS no <i>Plaxis 2D</i>	81
Figura 29: Exemplo de resultados de simulação no <i>Plaxis 2D</i> para GC=99% e NA normal: (a) Deslocamentos horizontais e (b) Deslocamentos verticais	83
Figura 30: Exemplo de resultados de simulação no <i>Plaxis 2D</i> para GC=99% e NA normal: (a) Pontos de plastificação e (b) Fator de segurança em função das operações acumuladas.....	84
Figura 31: (a) Deslocamentos horizontais e (b) deslocamentos verticais em função do GC e NA	85
Figura 32: FS para GC=99%, I= 32° e NA crítico.....	99
Figura 33: FS para GC=99%, I= 32° e NA normal	99
Figura 34: FS para GC=93%, I= 32° e NA crítico.....	100
Figura 35: FS para GC=93%, I= 32° e NA normal	100
Figura 36: FS para GC=88%, I= 32° e NA crítico.....	101
Figura 37: FS para GC=88%, I= 32° e NA normal	101
Figura 38: FS para GC=99%, I= 32°, NA crítico e Análise Direita-Esquerda	102
Figura 39: FS para GC=99%, I= 32°, NA normal e Análise Direita-Esquerda.....	102
Figura 40: FS para GC=93%, I= 32°, NA crítico e Análise Direita-Esquerda	103
Figura 41: FS para GC=93%, I= 32°, NA normal e Análise Direita-Esquerda.....	103
Figura 42: FS para GC=88%, I= 32°, NA crítico e Análise Direita-Esquerda	104
Figura 43: FS para GC=88%, I= 32°, NA normal e Análise Direita-Esquerda.....	104
Figura 44: FS para GC=99%, I= 25° e NA crítico.....	105
Figura 45: FS para GC=99%, I= 25° e NA normal	105
Figura 46: FS para GC=93%, I= 25° e NA crítico.....	106
Figura 47: FS para GC=93%, I= 25° e NA normal	106
Figura 48: FS para GC=88%, I= 25° e NA crítico.....	107
Figura 49: FS para GC=88%, I= 25° e NA normal	107
Figura 50: FS para GC=99%, I= 39° e NA crítico.....	108
Figura 51: FS para GC=99%, I= 39° e NA normal	108
Figura 52: FS para GC=93%, I= 39° e NA crítico.....	109

Figura 53: FS para GC=93%, I= 39° e NA normal	109
Figura 54: FS para GC=88%, I= 39° e NA crítico.....	110
Figura 55: FS para GC=88%, I= 39° e NA normal	110
Figura 56: Deslocamentos horizontais para GC=99% e NA normal	111
Figura 57: Deslocamentos verticais para GC=99% e NA normal.....	111
Figura 58: Pontos de plastificação para GC=99% e NA normal.....	112
Figura 59: Deslocamentos horizontais para GC=93% e NA normal	112
Figura 60: Deslocamentos verticais para GC=93% e NA normal.....	113
Figura 61: Pontos de plastificação para GC=93% e NA normal.....	113
Figura 62: Deslocamentos horizontais para GC=88% e NA normal	114
Figura 63: Deslocamentos verticais para GC=88% e NA normal.....	114
Figura 64: Pontos de plastificação para GC=88% e NA normal.....	115
Figura 65: Deslocamentos horizontais para GC=99% e NA crítico.....	115
Figura 66: Deslocamentos verticais para GC=99% e NA crítico.....	116
Figura 67: Pontos de plastificação para GC=99% e NA crítico	116
Figura 68: Deslocamentos horizontais para GC=93% e NA crítico.....	117
Figura 69: Deslocamentos verticais para GC=93% e NA crítico.....	117
Figura 70: Pontos de plastificação para GC=93% e NA crítico	118
Figura 71: Deslocamentos horizontais para GC=88% e NA crítico.....	118
Figura 72: Deslocamentos verticais para GC=88% e NA crítico.....	119
Figura 73: Pontos de plastificação para GC=88% e NA crítico	119
Figura 74: FS para GC = 99% e NA normal	120
Figura 75: FS para GC = 93% e NA normal	120
Figura 76: FS para GC = 88% e NA normal	121
Figura 77: FS para GC = 99% e NA crítico	121
Figura 78: FS para GC = 93% e NA crítico	122
Figura 79: FS para GC = 88% e NA crítico	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições para ensaio de cisalhamento direto: $GC_{previstos}$ e σ_n aplicadas aos corpos de prova ensaiados	49
Tabela 2: Situações analisadas na primeira rodada de simulações computacionais no <i>Slide2</i> .53	
Tabela 3: Situações analisadas na segunda rodada de simulações computacionais no <i>Slide2</i> .55	
Tabela 4: Resumo dos parâmetros de entrada no <i>software Slide2</i> para cada GC.....	55
Tabela 5: Situações analisadas nas simulações computacionais no <i>Plaxis 2D</i>	57
Tabela 6: Resumo dos parâmetros de entrada no <i>software Plaxis 2D</i> para cada GC.....	58
Tabela 7: Composição granulométrica, massa específica dos grãos, limites de consistência e parâmetros de compactação do RMFF	61
Tabela 8: Dados de teor de umidade, massa específica aparente seca e grau de compactação dos corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento direto	62
Tabela 9: Coeficientes de variação dos parâmetros do processo de moldagem.....	63
Tabela 10: Tensão normal e tensão cisalhante na ruptura para RMFF compactado	63
Tabela 11: Verificação do critério de aprovação dos CPs submetidos ao ensaio de cisalhamento direto.....	64
Tabela 12: Parâmetros de resistência ao cisalhamento para cada $GC_{médio}$	66
Tabela 13: Referências para comparação de parâmetros de resistência ao cisalhamento	66
Tabela 14: Valores do E_{oed} , coeficiente de permeabilidade, teor de umidade e massa específica aparente seca para cada corpo de prova ensaiado, em função do GC_{real} e da tensão vertical aplicada.....	69
Tabela 15: Referências para comparação de coeficientes de permeabilidade.....	73
Tabela 16: Resumo dos resultados das análises de primeira rodada no <i>software Slide2</i>	74
Tabela 17: Resumo dos resultados das análises de segunda rodada no <i>software Slide2</i>	75
Tabela 18: Resumo dos resultados das simulações no <i>software Plaxis 2D</i>	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTM	American Society for Testing and Materials
CV	Coefficiente de variação
DP	Desvio padrão
FS	Fator de Segurança
ICMM	International Council On Mining And Metals
I	Inclinação
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IEA	International Energy Agency
GC	Grau de Compactação
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEF	Método de Elementos Finitos
MEL	Método do Equilíbrio Limite
NA	Nível d'água
NBR	Normas Brasileiras
PIB	Produto Interno Bruto
PN	Proctor Normal
RMF	Rejeito de minério de ferro
RMFF	Rejeito de minério de ferro filtrado
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ	Ângulo de atrito
c	Coesão efetiva
E_{oed}	Módulo de elasticidade oedométrico
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
$GC_{previsto}$	Grau de compactação previsto
GC_{real}	Grau de compactação real
$GC_{médio}$	Grau de compactação médio
k	Coefficiente de permeabilidade
kPa	Quilopascal
kN/m^3	Quilonewton por metro cúbico
m	Metros
m^3	Metros cúbicos
m/s	Metros por segundo
MPa	Megapascal
w	Teor de umidade
$w_{ótimo}$	Teor de umidade ótimo
ρ_s	Massa específica real dos sólidos
ρ_d	Massa específica aparente seca
$\rho_{dmáx}$	Massa específica aparente seca máxima
γ_d	Peso específico seco
σ'_v	Tensão vertical efetiva

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	19
1.2	OBJETIVOS.....	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	23
2.2	MÉTODOS TRADICIONAIS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	24
2.3	EMPILHAMENTO DE REJEITOS FILTRADOS.....	26
2.3.1	Conceito e fundamentos do empilhamento de rejeitos filtrados.....	26
2.3.2	Histórico de uso do empilhamento de rejeitos filtrados	28
2.3.3	Processo de filtragem de rejeitos de mineração.....	29
2.3.4	Influência da filtragem no comportamento geotécnico de pilhas de rejeitos filtrados .	31
2.3.5	Avanços tecnológicos no empilhamento de rejeitos filtrados	32
2.3.6	Desafios técnicos associados às pilhas de rejeitos filtrados	33
2.3.7	Estabilidade geotécnica de pilhas de rejeitos filtrados	34
2.3.8	Propriedades geotécnicas relevantes dos rejeitos filtrados.....	35
2.3.9	Técnicas de reforço e melhoria da estabilidade de pilhas de rejeitos filtrados.....	36
2.3.10	Modelagem numérica aplicada a pilhas de rejeitos filtrados.....	37
2.3.11	Metodologias empregadas em estudos de referência.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	COLETA E PREPARO DA AMOSTRA.....	44
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E COMPACTAÇÃO.....	44
3.3	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	47
3.4	ENSAIOS DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO E PERMEABILIDADE.....	50
3.5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O SOFTWARE SLIDE2.....	52
3.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM SOFTWARE PLAXIS 2D	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59

4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	59
4.2	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	61
4.3	ENSAIOS DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO E DE PERMEABILIDADE.....	67
4.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO <i>SOFTWARE SLIDE2</i>	73
4.5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO <i>SOFTWARE PLAXIS 2D</i>	80
5	CONCLUSÕES.....	87
	REFERÊNCIAS.....	89
	ANEXO A – ANÁLISES SLIDE2.....	99
	ANEXO B – ANÁLISES PLAXIS 2D.....	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

A mineração desempenha papel estratégico no desenvolvimento econômico global, sendo responsável pelo fornecimento de matérias-primas essenciais para setores como construção civil, indústria metalúrgica, transporte, eletrônica e geração de energia. No Brasil, a atividade mineral possui relevância expressiva, contribuindo de forma significativa para o Produto Interno Bruto (PIB) e para a geração de empregos diretos e indiretos (Bansah *et al.*, 2025). Além disso, o crescimento da demanda por minerais tem sido intensificado pela transição energética e pela expansão de tecnologias de baixo carbono, que dependem fortemente de recursos minerais como ferro, lítio, níquel e cobalto (IEA, 2023).

O aumento da produção mineral, entretanto, implica, de forma inerente, na geração de grandes volumes de rejeitos, sobretudo em grandes operações. Estimativas indicam que cerca de 275 milhões de toneladas de rejeitos e estéreis de mineração são produzidos e armazenados anualmente no Brasil, com destaque para a mineração de ferro, antes de qualquer processo de reaproveitamento ou estabilização (Dauce *et al.*, 2019). Nesse contexto, a gestão adequada desses materiais configura-se como um dos principais desafios técnicos, ambientais e institucionais do setor mineral.

Os rejeitos de mineração são resíduos sólidos ou semissólidos oriundos do processamento mineral, geralmente compostos por partículas finas e elevado teor de água, apresentando comportamento geotécnico complexo, caracterizado por baixa permeabilidade, elevada compressibilidade e sensibilidade à variação de umidade (Demoz, 2022). Portanto, por conta dessas características, a forma como esses materiais são dispostos pode exercer influência direta sobre a segurança operacional, o desempenho geotécnico e os impactos ambientais associados às atividades minerárias.

Historicamente, a disposição de rejeitos tem sido realizada predominantemente por meio de barragens hidráulicas. Contudo, a estabilidade dessas estruturas representa um desafio crítico da engenharia geotécnica, uma vez que estão sujeitas a variações climáticas, ações sísmicas e processos de infiltração, que podem elevar a pressão neutra e reduzir a resistência ao cisalhamento dos rejeitos saturados (Rodríguez *et al.*, 2021; Bellido; Aguilar, 2024). Nos últimos anos, rupturas catastróficas de barragens de rejeitos, como as ocorridas em Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, evidenciaram de forma contundente a vulnerabilidade desse modelo de disposição, configurando marcos críticos dos impactos socioambientais e econômicos associados à mineração no Brasil (Rocha, 2021).

Segundo Primo *et al.* (2021), em Mariana, a ruptura da barragem de Fundão liberou cerca de 45 a 60 milhões de m³ de rejeitos, provocou 19 mortes e contaminou mais de 670 km da bacia do rio Doce. Já em Brumadinho, o rompimento da barragem B1 despejou, aproximadamente, 12 milhões de m³ de rejeitos, resultando em cerca de 270 óbitos e na degradação de extensas áreas ao longo do rio Paraopeba (Vergilio *et al.*, 2020). Em ambos os casos, constata-se que os impactos extrapolaram os danos ambientais imediatos, provocando destruição de comunidades, perda de biodiversidade, comprometimento da qualidade da água e efeitos sociais, econômicos e sanitários de longo prazo sobre as populações atingidas.

Em resposta a esses eventos, observou-se um fortalecimento significativo do arcabouço legal relacionado à segurança de barragens. No Brasil, a promulgação da Lei nº 14.066 proibiu a implantação de novas barragens construídas pelo método de alteamento à montante e estabeleceu exigências mais rigorosas quanto ao monitoramento, ao plano de ação de emergência e aos critérios de estabilidade e segurança estrutural (Brasil, 2020a). Normativas complementares, como a Resolução ANM nº 95 (Brasil, 2022) e a Resolução CNRH nº 241 (Brasil, 2024), reforçam a necessidade de reavaliação da segurança dessas estruturas e ampliam as restrições à disposição hidráulica de rejeitos. Nesse cenário, verifica-se que o marco regulatório vigente tem incentivado a busca por métodos alternativos de disposição, visando reduzir a dependência de rejeitos saturados e de grandes estruturas de contenção.

Nesse contexto, o empilhamento de rejeitos filtrados, também denominado empilhamento a seco (*dry stacking*), tem se destacado como uma alternativa tecnicamente promissora. Esse método baseia-se na remoção prévia da maior parte da água contida nos rejeitos, por meio de processos de filtração, resultando em um material com menor teor de umidade (*w*), comportamento predominantemente não saturado e maior controle construtivo durante a disposição (Cacciuttolo; Atencio, 2023). Estudos indicam que pilhas de rejeitos filtrados apresentam menor suscetibilidade à liquefação, maior previsibilidade geotécnica e menor risco de falhas catastróficas quando comparadas às barragens convencionais (Venturin, 2022).

Apesar das vantagens associadas ao empilhamento de rejeitos filtrados, a estabilidade geotécnica das pilhas depende fortemente das propriedades do material e das condições operacionais adotadas. Entre os fatores críticos, destaca-se o grau de compactação dos rejeitos filtrados, que influencia diretamente a resistência ao cisalhamento, rigidez, plastificação e o comportamento hidráulico do maciço (Silva *et al.*, 2024). Variações no grau de compactação podem comprometer a estabilidade das pilhas, especialmente sob condições desfavoráveis, como chuvas intensas ou carregamentos cíclicos, aumentando o risco de deformações excessivas ou, em situações extremas, de ruptura (Macedo; Vergaray, 2021; Wang *et al.*, 2022).

Do ponto de vista técnico-científico, embora o empilhamento de rejeitos filtrados venha sendo amplamente investigado, ainda persistem incertezas relevantes quanto ao impacto da variação do grau de compactação não apenas na estabilidade global das pilhas, mas também em seu comportamento deformacional. Permanece pouco explorada a possibilidade de otimização do grau de compactação como variável de projeto, de modo a equilibrar segurança geotécnica e viabilidade econômica, considerando que compactações excessivas podem elevar significativamente os custos operacionais (horas-trabalho e horas-máquina), enquanto níveis insuficientes podem comprometer o desempenho estrutural das pilhas. Como evidência, observa-se, em muitos estudos, apenas a realização de ensaios experimentais (Balbino, 2022; Consoli *et al.*, 2022; Carneiro *et al.*, 2023), ou a análise isolada da estabilidade, sem a avaliação integrada dos deslocamentos, da plastificação do maciço e da influência conjunta da geometria da pilha e das condições de nível d'água (Machado, 2022; Leroy *et al.*, 2024).

Diante desse contexto, esta pesquisa propõe-se a reduzir essas incertezas por meio de uma análise integrada e paramétrica da influência do grau de compactação no desempenho geotécnico de pilhas de rejeito de minério de ferro filtrado. O estudo diferencia-se dos trabalhos existentes ao avaliar sistematicamente três diferentes graus de compactação, combinando resultados de ensaios laboratoriais de caracterização física, resistência, adensamento e permeabilidade com análises computacionais de estabilidade pelo método do equilíbrio limite e de deformabilidade pelo método dos elementos finitos. De forma resumida, este trabalho busca responder à seguinte pergunta: “Pilhas de RMFF podem ser compactadas em graus inferiores a 100% de forma a promover uma otimização nos projetos e o desenvolvimento sustentável?”.

As simulações consideram, de forma comparativa, diferentes geometrias de pilhas e condições de NA, permitindo identificar limites técnicos para a redução do grau de compactação sem prejuízo da segurança estrutural. Dessa forma, a pesquisa fornece um subsídio técnico para a definição de critérios de projeto mais racionais, contribuindo para o aprimoramento das práticas de disposição a seco e para a gestão mais segura e economicamente eficiente dos rejeitos de mineração.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é analisar, de forma integrada e paramétrica, a influência do grau de compactação na energia Proctor Normal (PN) sobre a estabilidade geotécnica e o comportamento deformacional de pilhas de rejeito de minério de ferro filtrado sob diferentes condições de geometria e nível d'água, por meio da combinação de ensaios laboratoriais com modelagens computacionais, visando identificar condições de projeto e fornecer um subsídio técnico que demonstre segurança estrutural para pilhas com graus de compactação menores.

Como objetivos secundários, relacionados ao objetivo principal, têm-se:

- Avaliar a influência do grau de compactação nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, rigidez e permeabilidade do rejeito filtrado, por meio de ensaios laboratoriais de compactação, cisalhamento direto, adensamento oedométrico e permeabilidade;
- Investigar a influência do grau de compactação na estabilidade global de pilhas de rejeito filtrado, considerando diferentes geometrias de taludes e condições de nível d'água por meio de análises computacionais pelo método do equilíbrio limite;
- Analisar o comportamento deformacional das pilhas, avaliando deslocamentos e zonas de plastificação em função do grau de compactação e nível d'água, por meio de modelagem computacional pelo método dos elementos finitos, onde os valores de deslocamentos e pontos de plastificação serão utilizados como foco das análises;
- Comparar o desempenho geotécnico das pilhas para diferentes graus de compactação, identificando limites e fornecendo subsídios técnicos que permitam a redução do grau de compactação sem comprometimento da segurança estrutural.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A gestão e a disposição de rejeitos de mineração constituem desafios centrais para a sustentabilidade e a segurança das operações minerais contemporâneas, especialmente diante do aumento da produção mineral e do endurecimento dos requisitos técnicos e normativos aplicáveis ao setor. Nesse contexto, a escolha do método de disposição exerce influência direta sobre o desempenho geotécnico, os riscos operacionais e os impactos ambientais associados às atividades minerárias. O presente referencial teórico tem como objetivo fundamentar conceitualmente o empilhamento de rejeitos filtrados, com ênfase nos rejeitos de minério de ferro, abordando suas características geotécnicas, os avanços tecnológicos relacionados à técnica e os principais fatores que condicionam a estabilidade das pilhas. Assim, busca-se estabelecer a base técnico-científica necessária para a análise da estabilidade geotécnica dessas estruturas, alinhando o estado da arte da literatura com os objetivos e a metodologia adotados neste estudo.

2.1 REJEITOS DE MINERAÇÃO

A mineração é uma atividade fundamental para o fornecimento de matérias-primas à indústria, mas gera, como subproduto inevitável, grandes volumes de rejeitos. Os rejeitos de mineração correspondem aos materiais resultantes das etapas de beneficiamento do minério, nos quais o teor do mineral de interesse é economicamente inviável para aproveitamento, sendo então destinados à disposição final (Carvalho *et al.*, 2024). As características físicas e mecânicas desses materiais variam de acordo com o tipo de minério processado, o método de beneficiamento adotado e as condições operacionais do empreendimento (Carneiro *et al.*, 2023).

No contexto da mineração brasileira, os rejeitos de minério de ferro (RMF) merecem destaque devido à expressiva produção nacional (IBRAM, 2024). Martinatto (2024) e Carneiro *et al.* (2023) afirmam que o beneficiamento do minério de ferro resulta, em geral, em rejeitos constituídos predominantemente por partículas finas de sílica, com frações variáveis de óxidos de ferro, apresentando comportamento geotécnico que depende fortemente de sua granulometria, teor de finos e condições de umidade. Segundo esses autores, tais características tornam imprescindível uma avaliação criteriosa do comportamento desses materiais quando destinados à disposição em estruturas geotécnicas.

A disposição de rejeitos de mineração constitui uma etapa crítica do ciclo produtivo mineral, pois envolve o armazenamento de grandes volumes de materiais com propriedades geotécnicas variáveis e potencial de risco associado (Rodríguez *et al.*, 2021). Tradicionalmente,

a disposição desses rejeitos tem sido realizada por meio de sistemas hidráulicos, com destaque para as barragens convencionais, nas quais o material é transportado em polpa e depositado em estruturas de contenção. Embora amplamente difundidos ao longo das últimas décadas, esses métodos apresentam limitações técnicas e operacionais que vêm sendo crescentemente questionadas (Rodríguez *et al.*, 2021; Brasil, 2020b; ANM, 2022).

2.2 MÉTODOS TRADICIONAIS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

A disposição hidráulica caracteriza-se pela elevada dependência de condições de saturação do rejeito, uma vez que grandes volumes de água permanecem incorporados ao material depositado. Essa condição favorece a geração de pressões neutras e reduz a resistência ao cisalhamento, tornando o sistema mais suscetível a instabilidades geotécnicas, especialmente sob variações de carga, eventos de chuva intensa ou falhas nos sistemas de drenagem (Oldecop; Rodari, 2021). Além disso, o controle das propriedades geotécnicas do rejeito ao longo do tempo torna-se mais complexo, dado o comportamento hidráulico predominantemente saturado dessas estruturas (Oldecop; Rodari, 2021).

Outro aspecto relevante refere-se aos riscos associados às estruturas convencionais de disposição, amplamente evidenciados por eventos de falhas e rupturas ocorridos em diferentes regiões do mundo. Esses episódios impulsionaram uma reavaliação dos métodos tradicionais, sobretudo no que se refere à segurança operacional e aos impactos ambientais potenciais (Davies; McRoberts, 2019). Como consequência, organismos reguladores e entidades do setor mineral passaram a adotar posturas mais restritivas quanto ao uso de sistemas baseados em disposição hidráulica.

No contexto normativo, observa-se um enrijecimento progressivo das exigências relacionadas à segurança de estruturas de disposição de rejeitos. Diretrizes internacionais recentes enfatizam a necessidade de reduzir o risco associado ao armazenamento de rejeitos, priorizando soluções que minimizem a dependência de grandes volumes de água e que permitam maior controle geotécnico do material disposto (ICMM, 2021; ICMM, 2023). Essas orientações refletem uma mudança de paradigma na gestão de rejeitos, com foco crescente em alternativas consideradas intrinsecamente mais seguras.

As barragens de rejeitos constituem, historicamente, o método hidráulico mais comumente utilizado para a disposição dos resíduos gerados no beneficiamento mineral, especialmente em operações de grande escala. Essas estruturas geotécnicas são projetadas para o armazenamento de rejeitos geralmente dispostos em forma de polpa, apresentando elevado teor de umidade e comportamento predominantemente saturado (Oldecop; Rodari, 2021).

De maneira geral, as barragens de rejeitos podem ser classificadas de acordo com o método construtivo empregado em seus alteamentos, sendo os principais os métodos de alteamento à montante, à jusante e por linha de centro. No método à montante, os sucessivos alteamentos são executados sobre o próprio rejeito previamente depositado, o que resulta em menor custo inicial, porém maior sensibilidade a variações de pressão neutra e condições de saturação. No método à jusante, os alteamentos são construídos no sentido oposto ao reservatório, apoiando-se predominantemente em materiais mais competentes, conferindo maior estabilidade estrutural. O método por linha de centro apresenta características intermediárias, combinando aspectos dos dois anteriores (Machado, 2022; Cardozo, 2024).

Apesar de sua ampla utilização ao longo das últimas décadas, especialmente do método à montante, eventos recentes de ruptura evidenciaram vulnerabilidades significativas associadas a esse tipo de estrutura, particularmente em condições de chuvas intensas, liquefação estática e falhas no controle de drenagem. No contexto brasileiro, os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019), evidenciaram de forma crítica os riscos associados à disposição hidráulica de rejeitos e ao armazenamento em estruturas alteadas sobre materiais saturados (Rocha, 2021; Do Carmo *et al.*, 2017; Resende *et al.*, 2023).

Como resposta a esses eventos, o arcabouço normativo brasileiro passou por alterações significativas. A promulgação da Lei nº 14.066 (Brasil, 2020a) estabeleceu, entre outras medidas, a proibição da construção de novas barragens pelo método de alteamento à montante e a obrigatoriedade de descaracterização das estruturas existentes desse tipo. Complementarmente, a Resolução ANM nº 95 (Brasil, 2022) consolidou critérios técnicos mais rigorosos para o projeto, operação e monitoramento de barragens de mineração, reforçando a necessidade de controle de pressão neutra, avaliação contínua da estabilidade e adoção de medidas preventivas.

Essas restrições normativas, associadas ao aumento das exigências relacionadas à segurança operacional, à gestão de riscos e à sustentabilidade ambiental, têm contribuído de forma decisiva para a busca por métodos alternativos de disposição de rejeitos (Cândido *et al.*, 2019). Nesse cenário, soluções que reduzam a dependência de estruturas hidráulicas e de rejeitos saturados passaram a ganhar destaque, com o empilhamento de rejeitos filtrados se consolidando como uma alternativa tecnicamente mais segura e alinhada às diretrizes regulatórias atuais (Venturin, 2022; Cacciuttolo; Atencio, 2023; ICM, 2023).

2.3 EMPILHAMENTO DE REJEITOS FILTRADOS

O empilhamento de rejeitos filtrados, também denominado empilhamento a seco (*dry stacking*), tem se consolidado como uma alternativa tecnicamente viável e mais segura para a disposição de rejeitos de mineração, especialmente no contexto das crescentes exigências por segurança operacional e sustentabilidade ambiental. Diferentemente dos métodos tradicionais baseados na disposição hidráulica, o empilhamento a seco fundamenta-se na remoção prévia de grande parte da água presente nos rejeitos, resultando em um material com comportamento geotécnico significativamente distinto e maior previsibilidade mecânica (Davies; McRoberts, 2019).

Como previamente mencionado, no Brasil, a extração de ferro tem grande presença na indústria de mineração nacional. Segundo o IBRAM (2024), instituto à frente de empresas que representam mais de 85% da mineração brasileira, o minério de ferro é o bem mineral que concentra os maiores investimentos nesse setor. Dessa forma, o principal tipo de pilha formada no país são as pilhas de rejeito de minério de ferro. Aplicando-se o processo de filtração, têm-se as chamadas pilhas de rejeito de minério de ferro filtrado (RMFF).

2.3.1 Conceito e fundamentos do empilhamento de rejeitos filtrados

O empilhamento de rejeitos filtrados consiste na disposição de rejeitos previamente submetidos a processos de separação sólido-líquido após o beneficiamento, de modo a reduzir substancialmente o teor de umidade do material antes de sua disposição final. O processo de filtração pode ser realizado por diferentes sistemas, como filtros prensa e filtros de disco, cujo objetivo principal é produzir um rejeito com consistência adequada para manuseio mecânico e disposição em camadas sucessivas, de forma semelhante à construção de aterros compactados (Machado, 2022). A Figura 1 traz um exemplo real de uma pilha típica de rejeito de minério filtrado.

Figura 1: Exemplo real de pilha de rejeito de minério filtrado



Fonte: Machado (2022)

Segundo Pereira (2024), como resultado da filtragem, os rejeitos passam a apresentar baixos teores de umidade, comportamento predominantemente não saturado e maior controle sobre a compactação durante a disposição, características que conferem ao material filtrado propriedades geotécnicas mais favoráveis quando comparadas àquelas dos rejeitos dispostos por via hidráulica, uma vez que a redução da água intersticial limita a geração de pressões neutras e contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento. Além disso, o empilhamento em estado não saturado permite maior controle construtivo e facilita a implementação de sistemas de drenagem superficial e interna.

Do ponto de vista conceitual, a principal diferença entre o rejeito filtrado e o rejeito disposto hidráulicamente reside no estado físico do material no momento da disposição. Enquanto a disposição hidráulica resulta em depósitos saturados, com comportamento fortemente dependente da dissipação de pressões neutras, o empilhamento a seco promove a formação de maciços com comportamento semelhante ao de solos granulares finos compactados, nos quais a estabilidade é governada principalmente pelas propriedades mecânicas do material e pelas condições de compactação (Carneiro *et al.*, 2023). Essa distinção é fundamental para compreender o potencial do empilhamento de rejeitos filtrados como método alternativo de disposição. A Figura 2 apresenta um comparativo representando as diferenças entre as etapas e os resultados finais de cada processo.

Figura 2: Comparação entre os processos de empilhamento hidráulico e filtrado de rejeitos de mineração



Fonte: Autor (2026)

2.3.2 Histórico de uso do empilhamento de rejeitos filtrados

Embora frequentemente associado a abordagens recentes de gestão de rejeitos, o empilhamento a seco não pode ser considerado uma técnica experimental. As primeiras aplicações industriais do empilhamento de rejeitos filtrados remontam às últimas décadas do século XX, inicialmente em operações de menor escala e em regiões onde a disponibilidade de água era limitada ou onde as condições geográficas dificultavam a implantação de barragens convencionais (Davies; McRoberts, 2019).

No cenário internacional, o empilhamento a seco tem sido adotado em diversos setores da mineração, com destaque para a mineração de ouro, cobre e minério de ferro. Em países como Canadá, Austrália e Chile, a técnica ganhou relevância em função das exigências ambientais mais rigorosas e das condições climáticas adversas para a disposição hidráulica (Davies; McRoberts, 2019). No Brasil, embora a adoção em larga escala seja mais recente, observa-se um crescimento significativo do interesse por essa técnica, especialmente após o endurecimento das normas de segurança e a busca por soluções que reduzam a dependência de grandes estruturas de contenção (Brasil, 2020b; ANM, 2022; Alves, 2020).

Mais recentemente, o empilhamento de rejeitos filtrados tem sido amplamente discutido como alternativa estratégica para operações de grande porte, inclusive em países em desenvolvimento, onde desafios relacionados à governança, clima e infraestrutura tornam a segurança de barragens ainda mais crítica (ICMM, 2023). Bansah *et al.* (2025) destacam que a adoção do empilhamento a seco, quando associada a projetos geotécnicos adequados, representa uma tendência global alinhada às boas práticas de mineração sustentável.

A consolidação do empilhamento de rejeitos filtrados como método de disposição reflete, portanto, um processo evolutivo impulsionado por fatores técnicos, regulatórios e socioambientais, reforçando seu papel como alternativa viável e alinhada às tendências contemporâneas da mineração sustentável.

2.3.3 Processo de filtragem de rejeitos de mineração

O processo de filtragem dos rejeitos de mineração tem início após as etapas de beneficiamento mineral, nas quais a polpa gerada apresenta elevada concentração de água. Como etapa preliminar, é comum a utilização de equipamentos de espessamento, cujo objetivo é aumentar a concentração de sólidos e reduzir o volume de água a ser tratado nos estágios subsequentes. Essa etapa contribui para a otimização do desempenho do sistema de filtragem e para a redução dos custos operacionais associados ao desaguamento (Alves, 2020).

Segundo Alves (2020), a polpa espessada é encaminhada aos sistemas de filtragem propriamente ditos, onde ocorre, de fato, a separação físico-mecânica entre a fase sólida e a fase líquida. Esse processo resulta na produção de um material com baixo teor de umidade, caracterizado por um estado não saturado, condição essencial para a viabilização do empilhamento a seco dos rejeitos.

Após a filtragem, o rejeito adquire consistência semelhante à de um solo úmido compactável, possibilitando seu transporte por correias transportadoras, caminhões fora de estrada ou sistemas mecanizados de empilhamento até a área de disposição final. A água removida durante essa etapa é, em grande parte, recuperada e recirculada para o processo industrial, contribuindo significativamente para a eficiência hídrica da operação e para a redução da demanda por captação de recursos hídricos externos (Machado, 2022).

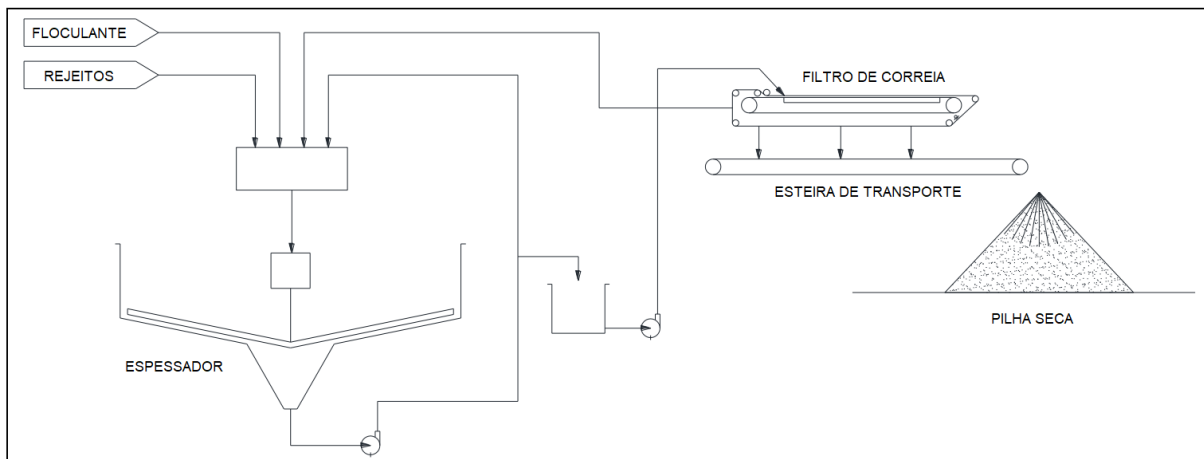
Dessa forma, as etapas do processo de filtragem exercem influência direta sobre o teor de umidade residual, a compactabilidade alcançável e o comportamento mecânico do rejeito filtrado, parâmetros fundamentais para a análise da estabilidade geotécnica das pilhas de rejeitos filtrados e para o desempenho seguro do sistema de disposição.

Diversos equipamentos podem ser empregados no processo de filtragem de rejeitos, sendo a seleção condicionada principalmente às características granulométricas do material, ao teor de finos, à taxa de produção requerida e às restrições operacionais da mina. Entre os sistemas mais utilizados na indústria mineral destacam-se os filtros prensa, os filtros de disco e os filtros de correia, amplamente empregados em projetos de empilhamento de rejeitos filtrados (Alves, 2020; Machado, 2022; Amoah, 2019; Cacciuttolo; Atencio, 2023).

Os filtros prensa têm se consolidado como a principal alternativa para operações de empilhamento a seco, sobretudo em empreendimentos de minério de ferro, devido à sua elevada eficiência na separação sólido-líquido. Esse tipo de equipamento possibilita a obtenção de rejeitos com baixos teores de umidade, favorecendo o estado não saturado do material e permitindo maior controle da compactação durante a formação das pilhas. Em contrapartida, eles apresentam maiores custos de investimento, operação e manutenção, além de ciclos operacionais descontínuos, o que pode limitar sua aplicação em operações de altíssima produção (Alves, 2020; Machado, 2022).

Os filtros de disco e de correia, por sua vez, são comumente utilizados em rejeitos de granulometria mais grossa e com menor teor de finos. Esses sistemas apresentam operação contínua e maior capacidade de processamento, o que os torna atrativos sob o ponto de vista operacional. No entanto, resultam, em geral, em rejeitos com teores de umidade residuais superiores aos obtidos por filtros prensa, exigindo maior atenção às etapas subsequentes de transporte, compactação e drenagem das pilhas (Amoah, 2019; Cacciuttolo; Atencio, 2023). A Figura 3 traz um exemplo esquemático do processo de filtragem através de um filtro de correia.

Figura 3: Esquema do processo de filtragem em um filtro de correia



Fonte: Adaptado de Lara *et al.* (2013)

Assim, a escolha do equipamento de filtragem exerce influência direta sobre o teor de umidade residual do rejeito e, conseqüentemente, sobre seu comportamento geotécnico, o que impacta parâmetros fundamentais como compactidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Esses aspectos reforçam a importância da integração entre o projeto do sistema de filtragem e a análise da estabilidade das pilhas de rejeitos filtrados.

2.3.4 Influência da filtragem no comportamento geotécnico de pilhas de rejeitos filtrados

A eficiência do processo de filtragem exerce influência direta no comportamento geotécnico das pilhas de rejeitos. Rejeitos adequadamente filtrados permitem um processo construtivo com melhor controle de compactação, menor permeabilidade e comportamento mecânico mais previsível, fatores essenciais para a estabilidade dos taludes e para a segurança global da pilha (Machado, 2022).

Como mencionado anteriormente, diferentemente dos rejeitos dispostos por via hidráulica, os rejeitos filtrados apresentam menor teor de umidade, comportamento predominantemente não saturado e maior possibilidade de controle de compactação durante a disposição, o que influencia diretamente sua resposta mecânica (Machado, 2022; Pereira, 2024). Essas particularidades conferem aos rejeitos filtrados um comportamento mais próximo ao de solos granulares finos, especialmente no que se refere à resistência ao cisalhamento e à deformabilidade (Pereira, 2024).

Entre as propriedades características mais relevantes dos rejeitos filtrados destacam-se a granulometria, o grau de compactação e o teor de umidade. A distribuição granulométrica exerce papel fundamental no controle da compactidade e da resistência do material, enquanto o teor de finos influencia a capacidade de drenagem e a suscetibilidade à geração de pressões neutras (Gomes *et al.*, 2019). Estudos experimentais indicam que rejeitos classificados como siltes de baixa compressibilidade podem apresentar ângulos de atrito elevados e baixa deformabilidade quando adequadamente compactados, favorecendo sua utilização em empilhamentos a seco (Pereira, 2024).

O teor de umidade dos rejeitos filtrados constitui outro parâmetro essencial para a avaliação da estabilidade geotécnica das pilhas. Valores de baixo teor de umidade, comumente observados em rejeitos de minério de ferro filtrados, representam uma menor saturação e, conseqüentemente, um menor risco de instabilidades associadas à percolação e perda de resistência ao cisalhamento (Alves, 2020). Dessa forma, o controle do teor de umidade associado a boas condições de drenagem superficial torna-se um aspecto central no desempenho geotécnico dessas estruturas.

O comportamento mecânico básico dos rejeitos filtrados está diretamente relacionado à sua condição de compactação e ao estado de tensões atuantes. Ensaio laboratoriais e análises numéricas demonstram que o aumento da densidade relativa resulta em ganhos significativos de resistência e estabilidade, reforçando a importância de critérios construtivos rigorosos durante a formação das pilhas (Carneiro, 2020; Consoli *et al.*, 2022). Nesse sentido, a adequada compactação geotécnica dos RMFF constitui etapa fundamental para o projeto seguro dessas estruturas.

Diante dessas características, os rejeitos de minério de ferro filtrados apresentam potencial significativo para a disposição por empilhamento a seco, desde que suas propriedades geotécnicas sejam devidamente conhecidas e controladas. A relação direta entre as características físicas e mecânicas dos rejeitos e a estabilidade das pilhas reforça a necessidade de estudos específicos voltados à análise geotécnica desses materiais, bem como à avaliação de métodos alternativos de disposição que priorizem a segurança operacional e a redução de riscos associados ao armazenamento de rejeitos na mineração.

2.3.5 Avanços tecnológicos no empilhamento de rejeitos filtrados

Os avanços tecnológicos associados ao empilhamento de rejeitos filtrados têm desempenhado papel fundamental na viabilização e expansão dessa técnica. Um dos principais progressos refere-se à evolução dos sistemas de filtração, que passaram a apresentar maior eficiência na remoção de água, aumento da capacidade operacional e maior confiabilidade em operações contínuas (Machado, 2022). Filtros prensa de grande porte e filtros de disco com elevada produtividade possibilitam a obtenção de rejeitos com teores de umidade controlados, compatíveis com a disposição em pilhas estáveis (Machado, 2022; Cacciuttolo; Atencio, 2023).

Outro avanço relevante diz respeito ao reaproveitamento da água recuperada durante o processo de filtração, que pode ser reinserida no circuito de beneficiamento, reduzindo o consumo hídrico da operação e contribuindo para a sustentabilidade do empreendimento (ICMM, 2021). Essa característica reforça o empilhamento de rejeitos filtrados como uma solução integrada, que atua simultaneamente na redução de riscos geotécnicos e na otimização do uso de recursos naturais.

O controle operacional também tem evoluído significativamente, com a adoção de técnicas mais rigorosas de compactação, monitoramento da umidade residual e instrumentação geotécnica das pilhas. Esses avanços permitem maior previsibilidade do comportamento das estruturas ao longo do tempo, favorecendo a melhoria da estabilidade global e a redução de incertezas associadas ao desempenho geotécnico (Consoli *et al.*, 2022). Dessa forma, os

avanços tecnológicos não apenas viabilizam o empilhamento a seco, mas também ampliam sua confiabilidade como método de disposição.

Por fim, *softwares* de análise de estabilidade geotécnica estão sendo cada vez mais aperfeiçoados e utilizados em pesquisas e projetos profissionais. Pesquisas como as de Machado (2022), Cândido (2023), Leroy *et al.* (2024) e Cândido *et al.* (2025) utilizaram o *Slide2* e o *Plaxis 2D* como ferramenta de análise geotécnica, demonstrando a relevância e eficácia desses *softwares* para simulações.

2.3.6 Desafios técnicos associados às pilhas de rejeitos filtrados

Apesar das vantagens e do avanço tecnológico observado, o empilhamento de rejeitos filtrados não está isento de desafios técnicos. Um dos principais aspectos críticos refere-se ao controle de compactação durante a formação das pilhas. A heterogeneidade do material, associada a variações no teor de umidade residual, pode comprometer a uniformidade da compactação e influenciar negativamente a estabilidade dos taludes (Venturin, 2022).

Sepúlveda *et al.* (2022) avaliaram o efeito da autocompactação prévia em rejeitos filtrados de cobre depositados sob condições não saturadas e seu impacto nas propriedades mecânicas do material. Para isso, foram realizados ensaios de consolidação unidimensional e triaxiais drenados em condições controladas de sucção, simulando o comportamento do rejeito sob peso próprio e diferentes graus de saturação. Os resultados mostraram que a autocompactação pode levar o material a atingir quase saturação, aumentando significativamente sua rigidez e resistência ao cisalhamento, evidenciando a influência do estado não saturado na estabilidade de depósitos de rejeitos filtrados.

Segundo Le e Pabst (2024), a influência da umidade residual constitui outro desafio relevante, uma vez que variações no teor de água podem alterar significativamente as propriedades mecânicas dos rejeitos filtrados. Eventos de chuva intensa ou falhas nos sistemas de drenagem podem levar ao aumento da saturação local, reduzindo a resistência ao cisalhamento e afetando o Fator de Segurança (FS) da pilha (Mmbando, 2024). Nesse contexto, o projeto adequado dos sistemas de drenagem superficial e interna torna-se essencial para o desempenho seguro dessas estruturas.

Além dos aspectos construtivos e operacionais, fatores climáticos têm ganhado destaque nas análises de estabilidade de pilhas de rejeitos filtrados. Tariq *et al.* (2025) indicam que a intensificação de eventos extremos de precipitação, associada às mudanças climáticas, pode comprometer o desempenho geotécnico dessas estruturas, especialmente quando os sistemas de drenagem não são dimensionados de forma conservadora. Dessa forma, a consideração de

cenários hidrológicos críticos torna-se indispensável no projeto e na avaliação de segurança de pilhas de rejeitos filtrados.

Estudos experimentais e numéricos demonstram que a saturação parcial ou local dos rejeitos filtrados pode comprometer o comportamento não saturado, reduzindo a sucção matricial e aumentando a geração de pressões neutras. Como consequência, observa-se uma redução progressiva da estabilidade, especialmente em regiões próximas à base da pilha ou em zonas com drenagem deficiente (Mmbando, 2024). Esses resultados evidenciam a importância do projeto adequado de sistemas de drenagem superficial e interna, capazes de minimizar a infiltração e promover o escoamento eficiente da água.

Casos analisados na literatura indicam que condições críticas de instabilidade tendem a ocorrer quando há combinação de elevada altura da pilha, compactação inadequada e eventos climáticos extremos. Em tais cenários, a ausência de sistemas de drenagem eficientes pode resultar em mecanismos de ruptura progressiva ou global, reforçando a necessidade de análises geotécnicas que considerem cenários desfavoráveis de umidade e percolação (Le; Pabst, 2024).

A estabilidade global de taludes em pilhas de rejeitos filtrados também demanda atenção especial, especialmente em empilhamentos de grande altura. A definição adequada dos ângulos de inclinação das bermas, associada ao conhecimento preciso dos parâmetros geotécnicos do material, é fundamental para evitar mecanismos de ruptura progressiva ou global (Carneiro, 2020). Além disso, a resposta das pilhas sob condições climáticas adversas, como chuvas prolongadas, reforça a necessidade de análises geotécnicas detalhadas e conservadoras (Le; Pabst, 2024; Mmbando, 2024).

Diante desses desafios, evidencia-se a necessidade de parâmetros geotécnicos confiáveis e representativos para a análise da estabilidade das pilhas de rejeitos filtrados. A literatura aponta que a variabilidade dos rejeitos, associada às condições operacionais e ambientais, ainda constitui uma fonte de incerteza, justificando a realização de estudos específicos voltados à caracterização e modelagem do comportamento geotécnico dessas estruturas (Consoli *et al.*, 2024). Assim, embora o empilhamento de rejeitos filtrados represente um avanço significativo na gestão de rejeitos, sua aplicação segura depende de análises técnicas aprofundadas, que fundamentem o projeto e a operação das pilhas ao longo de sua vida útil.

2.3.7 Estabilidade geotécnica de pilhas de rejeitos filtrados

A estabilidade geotécnica das pilhas de rejeitos filtrados deve ser analisada à luz de um cenário contemporâneo marcado por exigências ambientais mais rigorosas, mudanças climáticas e crescente pressão por eficiência operacional. Nesse contexto, a literatura recente

ênfatiza que a segurança dessas estruturas não pode ser avaliada apenas sob condições médias de operação, mas deve incorporar análises de risco associadas a eventos extremos e à variabilidade climática (Bansah *et al.*, 2025; Tariq *et al.*, 2025).

De acordo com Cacciuttolo e Atencio (2023), diferentemente das estruturas convencionais de disposição hidráulica, as pilhas de rejeitos filtrados apresentam comportamento governado por um conjunto específico de propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas, que influenciam diretamente os mecanismos de deformação e ruptura. Dessa forma, a avaliação adequada da estabilidade dessas estruturas depende de uma compreensão integrada das propriedades do material, das condições de umidade, das ações externas e das técnicas de reforço e modelagem empregadas.

A compactidade é outro fator determinante, pois está diretamente associada à resistência mecânica e à deformabilidade dos rejeitos filtrados. Estudos experimentais indicam que o aumento da densidade relativa resulta em ganhos significativos no ângulo de atrito e na rigidez do material, contribuindo para a elevação do FS das pilhas (Carneiro, 2020; Pereira, 2024). Esse aspecto reforça a importância do controle construtivo durante o empilhamento, especialmente no que se refere à espessura das camadas e aos procedimentos de compactação adotados.

Por fim, as propriedades geotécnicas dos rejeitos de minério filtrados desempenham papel fundamental no controle da estabilidade das pilhas. Entre essas propriedades, a granulometria destaca-se como um dos parâmetros primários, uma vez que influencia diretamente a permeabilidade, compactidade, resistência ao cisalhamento e tendência à plastificação do material. Rejeitos com distribuição granulométrica mais uniforme e menor teor de finos tendem a apresentar maior capacidade de drenagem e comportamento mecânico mais previsível (Gomes *et al.*, 2019).

2.3.8 Propriedades geotécnicas relevantes dos rejeitos filtrados

A resistência ao cisalhamento dos rejeitos filtrados compactados é comumente avaliada por meio de ensaios laboratoriais (como cisalhamento direto e triaxial) drenados e não drenados, fornecendo parâmetros de coesão efetiva (c) e ângulo de atrito (Φ) essenciais para análises de estabilidade. Resultados recentes indicam que rejeitos filtrados, quando adequadamente compactados, podem apresentar ângulos de atrito elevados, compatíveis com os de solos arenosos finos, e valores reduzidos de coesão aparente, especialmente em condições não saturadas (Carneiro *et al.*, 2023).

A deformabilidade sob compressão dos rejeitos filtrados compactados também é avaliada através de ensaios laboratoriais, como os ensaios oedométricos, que fornecem

parâmetros de rigidez do material analisado, como o módulo oedométrico (E_{oed}). Esses parâmetros influenciam diretamente na deformabilidade e plastificação das pilhas de rejeito analisadas (Machado, 2022; Cândido, 2023).

Segundo Ledesma *et al.* (2021), a plastificação de uma pilha de rejeito de mineração corresponde à transição do comportamento elástico para um regime de deformações permanentes e irreversíveis, no qual o material ultrapassa seu limite de resistência ao cisalhamento e passa a responder de forma não linear aos carregamentos impostos. Em termos geotécnicos, esse fenômeno indica perda de rigidez e redistribuição interna de tensões, frequentemente associadas ao aumento do grau de saturação, à presença de finos e a condições de compactação inadequadas. Na prática, a plastificação manifesta-se por recalques excessivos, deslocamentos laterais progressivos e redução do FS, podendo evoluir para mecanismos de instabilidade global quando submetida a novos alteamentos ou ações ambientais adversas, como chuvas intensas, comprometendo o desempenho estrutural e operacional da pilha (Ledesma *et al.*, 2021).

A permeabilidade dos rejeitos filtrados também exerce influência direta sobre o comportamento mecânico das pilhas, pois controla a dissipação de pressões neutras e o escoamento da água infiltrada. Valores típicos de coeficiente de permeabilidade (k) na ordem de 10^{-6} m/s têm sido reportados para rejeitos filtrados compactados, reduzindo a infiltração de água nas pilhas e a probabilidade de saturação generalizada do maciço, desde que garantidas boas condições de drenagem superficial (Venturin, 2022; Pereira, 2024).

Além disso, o comportamento não saturado dos rejeitos filtrados representa uma característica distintiva em relação aos rejeitos dispostos hidraulicamente. A presença de sucção matricial contribui para o aumento da resistência aparente do material, desempenhando papel relevante na estabilidade das pilhas, especialmente em condições iniciais de operação. Contudo, esse efeito é altamente dependente da variação do teor de umidade, exigindo atenção especial na definição dos parâmetros utilizados em análises geotécnicas (Illés *et al.*, 2022).

2.3.9 Técnicas de reforço e melhoria da estabilidade de pilhas de rejeitos filtrados

Com o objetivo de mitigar os riscos associados à instabilidade das pilhas de rejeitos filtrados, diversas técnicas de reforço e melhoria do comportamento geotécnico vêm sendo investigadas.

Ensaio laboratoriais e análises numéricas indicam que a adição de pequenas porcentagens de cimento, areia ou solo pode aumentar significativamente a coesão e o ângulo de atrito dos rejeitos filtrados, resultando em elevação do FS das pilhas e maior estabilidade em

longo prazo (Cândido *et al.*, 2025). Além disso, o uso de inclusões granulares, como camadas de material drenante, tem se mostrado eficaz na melhoria da drenagem interna e na redução da saturação local do maciço (Le; Pabst, 2024; Venturin, 2022).

Outra técnica amplamente estudada consiste no uso de geossintéticos como elementos de reforço. Du *et al.* (2022) adotaram uma metodologia experimental para avaliar o desempenho do reforço estrutural de rejeitos de mineração com geogrelhas, com foco na influência do tamanho da malha na interação solo-geogrelha. Essas técnicas apresentam aplicações práticas promissoras, especialmente em pilhas de grande altura ou em regiões sujeitas a variações climáticas significativas.

A utilização de geotêxteis como reforço para pilhas de rejeito filtrado também tem sido pesquisada. Li *et al.* (2024) investigaram experimentalmente a filtração e o entupimento de filtros geotêxteis em torno de tubos de drenagem em rejeitos finos, mostrando como a condutividade hidráulica decai ao longo do tempo devido ao bloqueio de poros e à formação de camadas-filtro, com implicações diretas para a eficiência de sistemas filtrantes em aplicações geotécnicas de rejeitos.

2.3.10 Modelagem numérica aplicada a pilhas de rejeitos filtrados

A modelagem numérica tem se consolidado como uma ferramenta essencial na análise da estabilidade de pilhas de rejeitos filtrados, permitindo a avaliação de diferentes cenários de carregamento, condições de umidade e técnicas de reforço. Métodos clássicos de análise de estabilidade, como o método de equilíbrio limite (MEL), têm sido amplamente utilizados para a estimativa do FS, enquanto métodos de elementos finitos (MEF) permitem a análise mais detalhada do comportamento tensão–deformação do maciço (Meyer; Olsewska, 2021).

A definição correta dos parâmetros geotécnicos constitui um aspecto crítico para a confiabilidade das simulações numéricas. A variabilidade intrínseca dos rejeitos, associada às incertezas experimentais e às limitações dos ensaios laboratoriais, pode influenciar significativamente os resultados das análises, exigindo calibração cuidadosa dos modelos a partir de dados representativos de campo e de laboratório. Além disso, as simulações numéricas apresentam limitações inerentes, como a simplificação das condições de contorno e a dificuldade de representar adequadamente o comportamento não saturado dos materiais, o que demanda interpretação criteriosa dos resultados obtidos (Meyer; Olsewska, 2021; Illés *et al.*, 2022).

Apesar dessas limitações, a modelagem numérica desempenha papel fundamental como ferramenta de apoio à decisão, permitindo a comparação entre diferentes alternativas de projeto,

a avaliação de cenários críticos e a definição de estratégias de mitigação de riscos. Quando integrada a dados de monitoramento e a análises experimentais, a modelagem numérica contribui significativamente para o aprimoramento da segurança e da confiabilidade das pilhas de rejeitos filtrados (Da Silva *et al.*, 2025).

Contudo, observa-se que, tanto nas análises de estabilidade baseadas em métodos de equilíbrio limite, frequentemente realizadas com o software *Slide*, quanto nas análises numéricas por meio do método dos elementos finitos, utilizando o *Plaxis*, a variação sistemática do grau de compactação ainda é pouco explorada como parâmetro central de investigação. Estudos como os de Cândido (2023), Leroy *et al.* (2024) e Winsa *et al.* (2025) adotam conjuntos fixos de propriedades geotécnicas, diferentes aditivos ou diferentes condições de saturação, sem estabelecer uma correspondência direta entre diferentes níveis de compactação, os parâmetros obtidos experimentalmente e seus efeitos sobre o FS, o comportamento deformacional e a evolução de zonas plastificadas no maciço. Dessa forma, permanece limitada na literatura a integração entre a caracterização geotécnica associada a distintos graus de compactação e a modelagem computacional da estabilidade e deformabilidade de pilhas de rejeitos filtrados sob diferentes condições de contorno, evidenciando uma lacuna relevante a ser abordada por análises paramétricas mais abrangentes.

Essas limitações justificam a necessidade de estudos específicos voltados à análise da estabilidade e deformabilidade geotécnica de pilhas de rejeitos filtrados, com foco na integração entre caracterização experimental, variação de graus de compactação, modelagem numérica e avaliação de cenários críticos, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais seguras e tecnicamente embasadas para a disposição de rejeitos na mineração.

2.3.11 Metodologias empregadas em estudos de referência

Por se tratar de uma área de extrema importância econômica e social, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos no intuito de contribuir para a adoção de boas práticas na indústria de mineração. Utilizados como base para as discussões e análises deste trabalho, os estudos empregam, de modo geral, uma combinação de metodologias experimentais, numéricas e analíticas voltadas à avaliação da estabilidade geotécnica de pilhas de rejeitos filtrados. Em nível experimental, destacam-se os ensaios de caracterização física e mecânica, como análise granulométrica, compactação Proctor, ensaios oedométricos, ensaios de permeabilidade, cisalhamento direto e ensaios triaxiais drenados e não drenados, utilizados para a obtenção de parâmetros de resistência, rigidez e permeabilidade dos rejeitos filtrados e pilhas de rejeitos filtrados.

No campo da modelagem computacional, métodos de equilíbrio limite (como o presente no *software Slide2*) e métodos baseados em elementos finitos (presente no software *Plaxis 2D*) têm sido aplicados para a análise da estabilidade global das pilhas, considerando diferentes geometrias, condições de carregamento e cenários de umidade. Esses modelos permitem a estimativa do FS, bem como a avaliação da distribuição de tensões e deformações no maciço, sendo amplamente utilizados como ferramentas de apoio ao projeto e à tomada de decisão (Meyer; Olszewska, 2021).

Balbino (2022) realizou uma caracterização geotécnica detalhada de um rejeito com comportamento do tipo argila (*clay-like*) proveniente do Quadrilátero Ferrífero. O trabalho baseou-se em ensaios laboratoriais de granulometria, limites de Atterberg, compressibilidade, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e adensamento. A metodologia permitiu compreender o comportamento mecânico e hidráulico desse tipo específico de rejeito, destacando sua elevada sensibilidade à variação de umidade e sua influência direta na estabilidade de depósitos de rejeitos.

Consoli *et al.* (2022) analisaram o comportamento mecânico de RMFF misturados com cimento Portland por meio de um programa experimental. Os corpos de prova foram moldados por compactação estática em camadas na energia Proctor Normal, com diferentes graus de compactação e teores de cimento. Foram realizados ensaios de compressão não confinada, determinação do módulo de cisalhamento inicial por ultrassom, ciclos de molhagem e secagem para avaliação de durabilidade e ensaios triaxiais consolidados drenados. Os resultados foram analisados em função do índice porosidade/cimento para determinar parâmetros geotécnicos como resistência, rigidez, coesão e ângulo de atrito.

Cândido (2023) avaliou o comportamento mecânico de misturas compostas pelo rejeito de minério de ferro filtrado, solo residual, cimento Portland e areia, com o objetivo de melhorar as propriedades geotécnicas desses compósitos. A metodologia do estudo incluiu ensaios de caracterização física, ensaios de compactação Proctor, ensaios de resistência ao cisalhamento e ensaios oedométricos. Além disso, foram realizadas análises numéricas no software *Plaxis 2D* para avaliar o comportamento tensão–deformação de pilhas constituídas por essas misturas. Os resultados indicaram que a incorporação controlada de solo residual, cimento e areia ao rejeito filtrado promoveu alterações significativas nos parâmetros mecânicos, como resistência ao cisalhamento e deformabilidade, fornecendo subsídios técnicos para aplicações em estruturas geotécnicas.

Machado (2022) investigou experimentalmente e numericamente a estabilização de rejeitos de minério de ferro filtrados para disposição em pilhas compactadas (*dry stacking*). A

metodologia empregada incluiu ensaios de filtragem, caracterização física, compactação, resistência mecânica e avaliação da estabilidade, através do *software Slide2*, para diferentes amostras de rejeito enriquecidas com estabilizantes. O estudo destacou a relação direta entre teor de umidade residual, compacidade e estabilidade das pilhas, sendo uma das principais referências metodológicas para a compreensão do processo de filtragem e do comportamento geotécnico dos rejeitos filtrados.

Venturin (2022) analisou a percolação em uma pilha de rejeito filtrado por meio de ensaios laboratoriais e simulações numéricas no *software Slide 3*. A metodologia envolveu a determinação e variação de parâmetros hidráulicos, como coeficiente de permeabilidade e a modelagem do fluxo de água em diferentes cenários de recarga hídrica. Os resultados evidenciaram a importância da drenagem interna e do controle da umidade para a manutenção da estabilidade das pilhas, fornecendo subsídios relevantes para análises de segurança associadas a eventos de chuva.

Carneiro *et al.* (2023) realizaram a caracterização detalhada de uma amostra de rejeito de minério de ferro com o objetivo de avaliar sua representatividade para estudos geotécnicos. A metodologia incluiu ensaios físicos, mineralógicos e mecânicos, permitindo a definição de parâmetros confiáveis para modelagens numéricas. O trabalho destaca a importância da seleção adequada de amostras e da variabilidade intrínseca dos rejeitos na confiabilidade das análises geotécnicas.

Gomes *et al.* (2019) desenvolveram uma caracterização mineralógica e geotécnica de rejeitos estocados em barragem de minério de ferro. A metodologia baseou-se em análises laboratoriais de composição mineralógica, granulometria, resistência e permeabilidade. Os autores demonstraram como a heterogeneidade dos rejeitos influencia seus comportamentos hidráulico e mecânico, contribuindo para a compreensão dos riscos associados à disposição convencional e reforçando a necessidade de métodos alternativos mais controláveis.

Amoah (2019) apresentou um estudo de caso em larga escala sobre a filtragem de rejeitos e o empilhamento a seco em uma operação de minério de ferro magnetítico. A metodologia adotada incluiu a avaliação do desempenho de sistemas industriais de filtragem, análise do teor de umidade obtido e observações operacionais do empilhamento. O trabalho evidencia a viabilidade técnica do *dry stacking* em escala industrial e sua aplicabilidade prática em operações de grande porte.

Meyer e Olszewska (2021) investigaram metodologias para a determinação do módulo de deformabilidade em condições naturais de solo siltoso, com foco em limitações experimentais e modelagem numérica. Embora não aplicado diretamente a rejeitos, o estudo

fornece importantes fundamentos metodológicos sobre a influência de parâmetros mecânicos na confiabilidade de simulações numéricas geotécnicas, sendo relevante para a interpretação dos resultados obtidos em análises de estabilidade.

Illés *et al.* (2022) estimaram o módulo confinado de solos siltosos a partir de ensaios de cone de penetração (CPT). A metodologia proposta correlaciona dados de campo com parâmetros mecânicos utilizados em modelagens geotécnicas, oferecendo uma abordagem alternativa para a obtenção de propriedades de deformabilidade. Essa metodologia contribui para a discussão sobre incertezas e variabilidade de parâmetros empregados em análises numéricas.

Jalalichi *et al.* (2025) realizaram uma retroanálise da estabilidade geotécnica de pilhas de estéril de grande altura, combinando dados de campo e modelagem numérica. A metodologia permitiu avaliar mecanismos de ruptura e calibrar parâmetros geotécnicos a partir de condições reais de operação. Embora aplicada a pilhas de estéril, a abordagem metodológica é diretamente relevante para a análise de pilhas de rejeitos filtrados.

Dias Neto *et al.* (2024) investigaram as características hidráulicas de rejeitos de minério de ferro de granulometria siltosa. A metodologia envolveu ensaios laboratoriais específicos para a determinação de curvas de retenção de água e parâmetros hidráulicos. Os resultados reforçam a importância do comportamento hidráulico e da condição não saturada na estabilidade de estruturas formadas por rejeitos finos.

Leroy *et al.* (2024) compararam os fatores de segurança de uma pilha de rejeito de minério utilizando os *softwares Slide2* e *Plaxis 2D* e concluíram que, para a pilha analisada, o método dos elementos finitos (*Plaxis 2D*) forneceu resultados muito próximos aos obtidos pelo método do equilíbrio limite (*Slide2*).

Winsa *et al.* (2025) investigaram o comportamento de recalque em um depósito de rejeitos por meio de modelagem numérica voltada à avaliação de deformações associadas a processos de consolidação. A metodologia considerou a consolidação do material ao longo do tempo, variações nas condições hidráulicas e a aplicação de cargas adicionais na superfície. Os resultados indicaram que alterações no regime de tensões efetivas e a condição de saturação podem intensificar as deformações verticais do depósito, evidenciando a importância de considerar esses fatores na análise do desempenho geotécnico de estruturas de armazenamento de rejeitos.

Os trabalhos apresentados evidenciam a relevância do estudo do comportamento geotécnico de pilhas de rejeitos filtrados na literatura contemporânea. Entretanto, ainda persistem lacunas importantes, especialmente quanto à consideração do grau de compactação

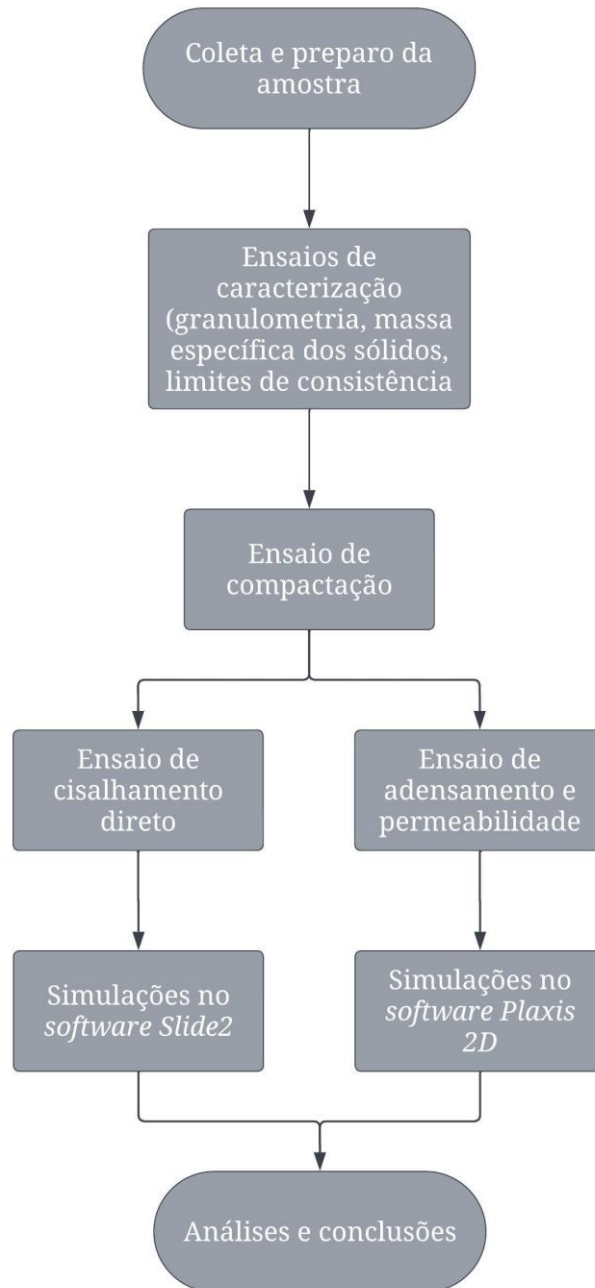
como variável de projeto. De modo geral, muitos estudos experimentais concentram-se na caracterização física, hidráulica ou mecânica dos rejeitos filtrados, sem integrar esses resultados a simulações computacionais. Por outro lado, pesquisas baseadas em análises numéricas de estabilidade frequentemente utilizam parâmetros fixos, sem estabelecer correspondência direta com dados experimentais obtidos para diferentes graus de compactação e condições de contorno.

Essa dissociação limita a compreensão integrada do efeito do grau de compactação no desempenho global das pilhas, sobretudo em cenários críticos que envolvem variações geométricas e de nível d'água. Nesse contexto, a integração entre a caracterização geotécnica experimental e a modelagem computacional sob diferentes condições de contorno neste trabalho constitui um diferencial técnico fundamental para a avaliação consistente do efeito do grau de compactação de rejeitos no desempenho geotécnico de estruturas formadas por este material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o material utilizado na pesquisa, bem como os métodos aplicados para ensaios laboratoriais e modelagem computacional. A Figura 4 apresenta um fluxograma que resume as etapas que foram realizadas.

Figura 4: Fluxograma das etapas da metodologia



Fonte: Autor (2026)

3.1 COLETA E PREPARO DA AMOSTRA

O rejeito de minério de ferro filtrado (RMFF) utilizado nesta pesquisa foi cedido por uma empresa de mineração localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, de onde foi coletado e transportado e armazenado no laboratório de Mecânica dos Solos do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora. O material foi disposto em bandejas para que fosse realizada a secagem ao ar e, posteriormente, o processo de destorroamento, conforme o disposto na NBR 6457 (ABNT, 2024a), para fins de ensaio de caracterização física, compactação, cisalhamento direto, adensamento e permeabilidade. Na Figura 5, é possível visualizar bandejas com o RMFF disposto para secagem ao ar (a) e após o destorroamento (b).

Figura 5: RMFF disposto em bandejas: (a) secagem ao ar e (b) destorroado



Fonte: Autor (2026)

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E COMPACTAÇÃO

A fim de determinar as características físicas e os parâmetros de compactação do RMFF, foram realizados ensaios no laboratório de Mecânica dos Solos do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

A curva granulométrica do RMFF foi definida seguindo os ensaios de peneiramento e sedimentação, procedimentos estes dispostos na NBR 7181 (ABNT, 2025a). A Figura 6 ilustra

os equipamentos utilizados para estes ensaios: peneiramento fino (a), peneiramento grosso (b) e sedimentação (c).

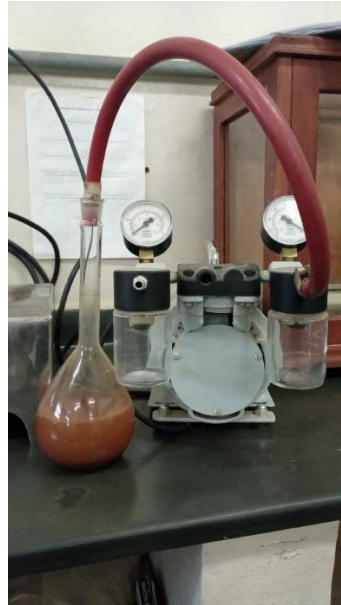
Figura 6: Equipamentos utilizados para: (a) peneiramento fino, (b) peneiramento grosso e (c) sedimentação



Fonte: Autor (2026)

A massa específica real dos sólidos (ρ_s) do RMFF foi determinada seguindo as recomendações da NBR 6458 (ABNT, 2025b), utilizando um picnômetro de 500 ml e bomba de vácuo, ilustrados na Figura 7.

Figura 7: Picnômetro com amostra de RMFF em processo de retirada do ar por bomba de vácuo



Fonte: Autor (2026)

Os limites de consistência do RMFF seguiram as metodologias descritas na NBR 6459 (ABNT, 2016) e na NBR 7180 (ABNT, 2025c) para o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), respectivamente. A Figura 8 ilustra os equipamentos utilizados para os ensaios do Limite de Liquidez (a) e do Limite de Plasticidade (b).

Figura 8: Equipamentos utilizados nos ensaios de: (a) LL e (b) LP



Fonte: Autor (2026)

O ensaio de compactação do RMFF foi realizado conforme a NBR 7182 (ABNT, 2020a), adotando-se a energia PN e sem reuso de rejeito compactado, com o objetivo de determinar a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo. A escolha da energia PN justifica-se por representar de forma mais adequada as condições usualmente empregadas em campo, especialmente em aterros compactados com controle de energia, além de estar alinhada a pesquisas similares, como as desenvolvidas por Consoli *et al.* (2022), Machado (2022) e Cândido (2023).

3.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto foi conduzido conforme a ASTM D3080-04 (ASTM, 2011), com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, notadamente a coesão efetiva e o ângulo de atrito. Os corpos de prova foram moldados por compactação estática em anel metálico com 6 cm de diâmetro e aproximadamente 2,2 cm de altura. A moldagem foi realizada com auxílio de prensa eletro-hidráulica, que aplicou carga compressiva a velocidade constante sobre o RMFF, garantindo maior controle e padronização do processo de compactação. A prensa utilizada (a) e o corpo de prova moldado no anel (b) estão apresentados na Figura 9.

Figura 9: Moldagem do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento direto: (a) prensa e (b) corpo de prova de RMFF moldado



Fonte: Autor (2026)

Foram moldados 18 corpos de prova para serem submetidos aos ensaios de cisalhamento direto, variando-se os graus de compactação previstos (GC_{previsto}) e as tensões normais aplicadas.

Inicialmente, foram idealizados três $GC_{\text{previstos}}$: 100%, 95% e 90%, a fim de se determinar a viabilidade prática da aplicação de graus de compactação inferiores a 100% em pilhas reais, o que poderia implicar redução de custos operacionais, especialmente relacionados ao consumo de combustível e ao tempo de operação dos equipamentos de compactação. A moldagem dos corpos de prova foi realizada mantendo-se constante o teor de umidade de referência, correspondente ao teor de umidade ótimo determinado no ensaio Proctor Normal do RMFF, admitindo-se variação máxima de $\pm 1\%$. A obtenção dos diferentes graus de compactação foi realizada por meio da variação controlada da massa seca introduzida no molde, de modo a atingir as massas específicas secas correspondentes a cada GC_{previsto} .

Além disso, os corpos de prova foram moldados em duplicidade, sendo submetidos às tensões de confinamento de 100, 200 e 400 kPa para cada GC_{previsto} , com base na metodologia dos trabalhos de Amoah (2019), Carneiro (2020) e Cândido (2023). A validação e aprovação

do processo de moldagem foram feitas a partir da análise do coeficiente de variação (CV), que deveria ser inferior a 10%, entre os graus de compactação reais (GC_{real}) e massa específica aparente seca (ρ_d). Já a validação e aprovação do processo de ruptura foram feitas a partir da análise do coeficiente de variação entre as tensões normais (σ_n) e tensões cisalhantes (τ) obtidas para cada tensão nominal em cada GC_{real} . As condições previstas para ensaio são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições para ensaio de cisalhamento direto: $GC_{previstos}$ e σ_n aplicadas aos corpos de prova ensaiados

Número do CP	$GC_{previsto}$ (%)	σ_n aplicada (kPa)
1	100	200
2	100	400
3	100	100
4	100	200
5	100	400
6	100	100
7	95	200
8	95	400
9	95	100
10	95	200
11	95	400
12	95	100
13	90	200
14	90	400
15	90	100
16	90	200
17	90	400
18	90	100

Fonte: Autor (2026)

Após a moldagem dos corpos de prova, eles foram levados à prensa de cisalhamento direto, sendo submetidos às etapas de saturação, adensamento e ruptura a uma velocidade constante de 0,1 mm/min. Por fim, foi feita a coleta e tratamento dos dados para o traçado da envoltória de resistência ao cisalhamento. Considerando-se a variação dos valores de GC_{real} dos

CPs em relação ao GC_{previsto} , foi determinada a média aritmética ($GC_{\text{médio}}$) dos valores de GC_{real} . A Figura 10 mostra a prensa de cisalhamento direto utilizada no laboratório.

Figura 10: Prensa de cisalhamento direto



Fonte: Autor (2026)

3.4 ENSAIOS DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO E PERMEABILIDADE

O ensaio de adensamento oedométrico foi realizado com base no disposto na NBR 16853 (ABNT, 2020b), utilizando-se uma prensa do modelo Bishop de uso analógico com bureta graduada. O corpo de prova foi moldado através de compactação estática em um anel de metal, com diâmetro de 5,05 cm e altura de 2 cm, utilizando-se uma prensa eletro-hidráulica (Figura 9) de forma similar à moldagem realizada para o ensaio de cisalhamento direto. A Figura 11 apresenta o corpo de prova moldado no anel (a) e a prensa Bishop utilizada no ensaio (b).

Figura 11: (a) Corpo de prova de RMFF moldado para ensaio oedométrico e (b) Prensa Bishop para ensaio oedométrico



Fonte: Autor (2026)

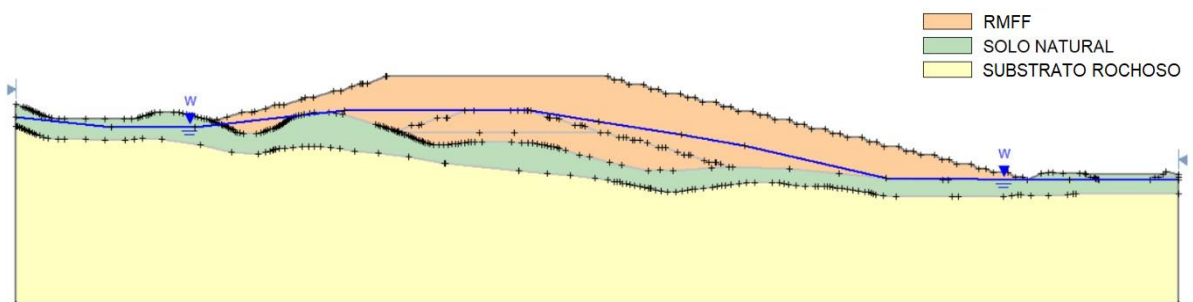
Dessa forma, foram moldados três corpos de prova, sendo um para cada $G_{C_{previsto}}$ (100%, 95% e 90%), que foram submetidos, cada um deles, às tensões de compressão de 5 kPa, 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 600 kPa. Ao fim de cada estágio de carregamento, foi feita a determinação do coeficiente de permeabilidade (k), conforme o procedimento prescrito na própria NBR 16853 (ABNT, 2020b). A tensão máxima de 600 kPa foi definida com base nas anilhas disponíveis e limite de altura do pêndulo disponível para

colocar as anilhas na prensa da UFJF e seguindo os trabalhos de Cândido (2023) e Machado (2022), cujos limites foram, respectivamente, 400 kPa e 800 kPa.

3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O SOFTWARE SLIDE2

Após a realização dos ensaios de laboratório, deu-se início às simulações computacionais, utilizando-se o *software Slide2*, que faz análise de estabilidade através de Método de Equilíbrio Limite, fornecendo Fatores de Segurança (FS). Para a realização das simulações, foi concebida uma análise teórica e técnica de outros trabalhos, a fim de se determinar todos os cenários a serem simulados computacionalmente. A geometria da pilha hipotética inicial foi escolhida com base em Machado (2022), que utilizou um material similar ao estudado neste trabalho, como pode ser verificado na Figura 12, e contou com três diferentes camadas: substrato rochoso, solo natural e, por fim, a pilha de rejeito compactado.

Figura 12: Geometria da pilha de RMFF considerada nas análises de estabilidade geotécnica



Fonte: Adaptado de Machado (2022)

O ângulo de inclinação da pilha original foi definido como o arcotangente da razão entre a altura e o comprimento das bermas individuais, o que gerou uma inclinação (I) de 32° . Ressalta-se que o talude é composto por bermas inclinadas seguidas por platôs que alternam entre 10 e 20 metros de comprimento em sequência e que a pilha, que possui altura variável, apresentou uma altura máxima de 100 metros.

Essa primeira pilha foi utilizada para a primeira rodada de análises, com o objetivo de se encontrar a condição mais crítica da pilha proposta, e, com base nisso, proporcionar a escolha de novas inclinações a serem analisadas na segunda rodada para melhor determinar a influência da geometria no FS. Outros fatores a serem considerados para as simulações foram os diferentes graus de compactação do RMFF (e seus respectivos parâmetros de resistência), nível d'água, considerando a condição saturada, e a direção do movimento da esquerda para a direita (E-D)

e da direita para a esquerda (D-E). Os níveis d'água também foram determinados com base no trabalho de Machado (2022).

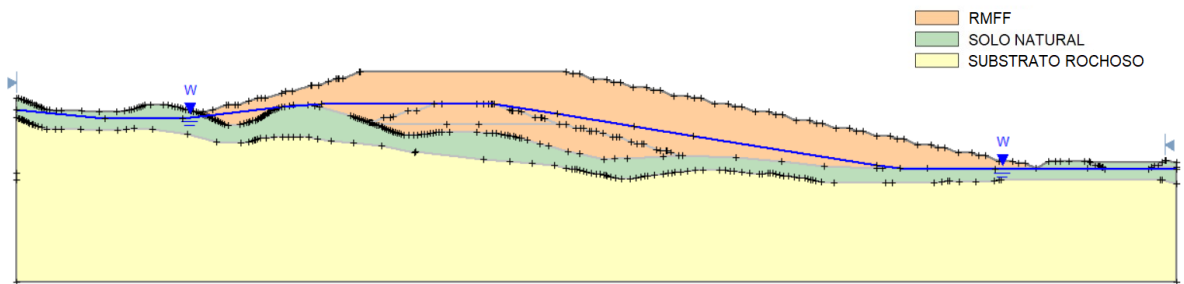
A fim de se obter uma melhor assertividade nos resultados, foram considerados três métodos de análise: Bishop simplificado, Morgenstern/Price e Janbu corrigido, métodos mais comumente utilizados para análises de FS, conforme Alok *et al.* (2024). A Tabela 2 a seguir traz um resumo de todas as situações analisadas na primeira rodada.

Tabela 2: Situações analisadas na primeira rodada de simulações computacionais no *Slide2*

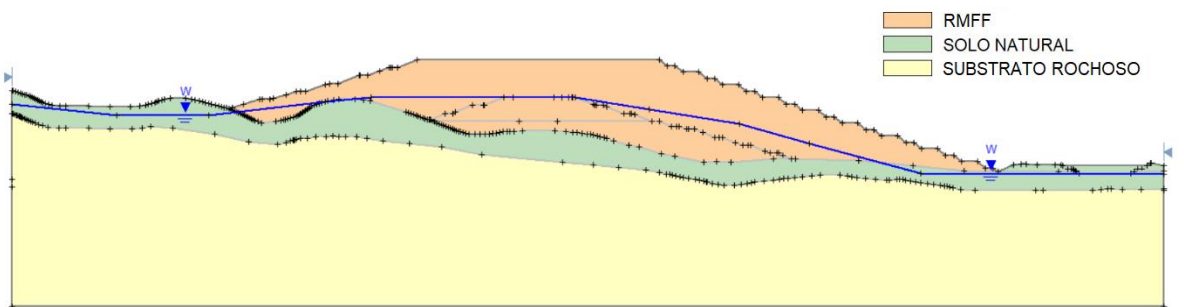
Simulação	GC_{previsto} (%)	I (°)	Nível d'água	Direção do movimento
1	100	32	Crítico	Esquerda-Direita
2	100	32	Normal	Esquerda-Direita
3	95	32	Crítico	Esquerda-Direita
4	95	32	Normal	Esquerda-Direita
5	90	32	Crítico	Esquerda-Direita
6	90	32	Normal	Esquerda-Direita
7	100	32	Crítico	Direita-Esquerda
8	100	32	Normal	Direita-Esquerda
9	95	32	Crítico	Direita-Esquerda
10	95	32	Normal	Direita-Esquerda
11	90	32	Crítico	Direita-Esquerda
12	90	32	Normal	Direita-Esquerda

Fonte: Autor (2026)

Após a primeira rodada de análises, foram definidas novas inclinações para proporcionar uma avaliação e comparação dos diversos FS obtidos com base na variação da inclinação da pilha. O lado da pilha escolhido para ser alterado foi o direito, devido à maior quantidade de RMFF e à maior altura disponível, o que permitiu uma maior liberdade de alteração. As novas análises foram realizadas para bermas com duas inclinações: 25° (uma inclinação conservadora e comumente utilizada em pilhas reais, por se tratar de um limite inferior para o ângulo de atrito de materiais granulares) (Carvalho, 2022); e 39° (uma inclinação maior que a original buscando verificar um limite superior para a inclinação da pilha), apresentadas, respectivamente, nas Figura 13 e Figura 14. O resumo das situações analisadas na segunda rodada também pode ser encontrado na Tabela 3.

Figura 13: Geometria da pilha de RMFF com $I = 25^\circ$ 

Fonte: Autor (2026)

Figura 14: Geometria da pilha de RMFF com $I = 39^\circ$ 

Fonte: Autor (2026)

Tabela 3: Situações analisadas na segunda rodada de simulações computacionais no *Slide2*

Simulação	GC_{previsto} (%)	I (°)	Nível d'água	Direção do movimento
13	100	22	Crítico	Esquerda-Direita
14	100	22	Normal	Esquerda-Direita
15	95	22	Crítico	Esquerda-Direita
16	95	22	Normal	Esquerda-Direita
17	90	22	Crítico	Esquerda-Direita
18	90	22	Normal	Esquerda-Direita
19	100	39	Crítico	Esquerda-Direita
20	100	39	Normal	Esquerda-Direita
21	95	39	Crítico	Esquerda-Direita
22	95	39	Normal	Esquerda-Direita
23	90	39	Crítico	Esquerda-Direita
24	90	39	Normal	Esquerda-Direita

Fonte: Autor (2026)

Os parâmetros de entrada para cada GC de foram definidos com base nos resultados do ensaio de cisalhamento direto. Já os parâmetros de entrada para a camada de solo natural e substrato rochoso foram definidos hipoteticamente, considerando-se apenas a faixa disponível na literatura para solos moles (pior caso, a favor da segurança) e rochas, conforme He *et al.* (2023) e Villeneuve e Heap (2021). A seguir tem-se a Tabela 4, que traz o resumo com os parâmetros de entrada.

Tabela 4: Resumo dos parâmetros de entrada no *software Slide2* para cada GC

Camada	γ_d (kN/m³)	c (kPa)	Φ (°)
GC _{médio} = 99%	20,6	9,8	33,3
GC _{médio} = 93%	19,2	1,8	30,5
GC _{médio} = 88%	18,3	1,4	29,9
Solo natural	20	1	20
Substrato rochoso	25	100	35

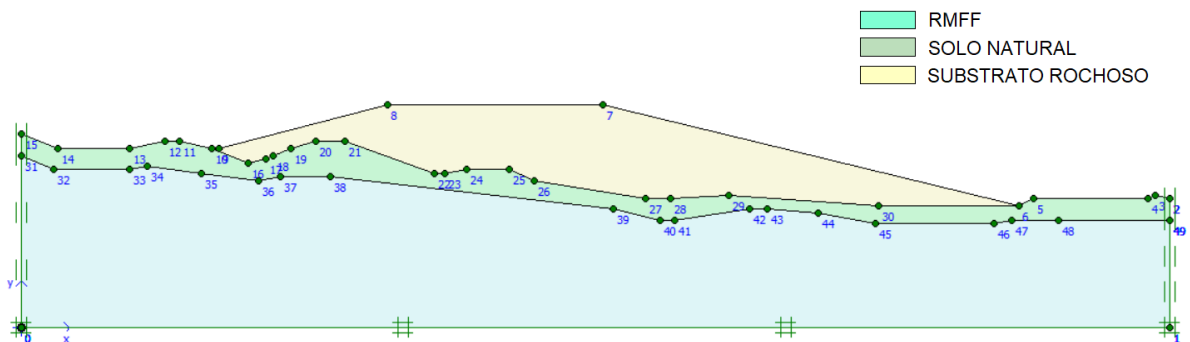
Fonte: Autor (2026)

3.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM SOFTWARE PLAXIS 2D

O *Plaxis 2D*, um programa computacional que utiliza métodos de elementos finitos para realizar simulações mecânicas em obras geotécnicas, foi utilizado como ferramenta para analisar os deslocamentos horizontais, deslocamentos verticais, pontos de plastificação e fatores de segurança para cada grau de compactação previsto e nível d'água.

A geometria da pilha foi a mesma utilizada originalmente na simulação com *software Slide2*, porém ligeiramente simplificada (as bermas de suavização foram retiradas de maneira a reduzir o trabalho manual de desenho da pilha sem exercer influência sobre os resultados, visto que a análise de estabilidade e deformabilidade se concentraram na estrutura global e não em pontos localizados), sendo ilustrada na Figura 15. Foi definido que seria utilizado o E_{oed} e o k obtidos referentes ao estágio de 400 kPa como parâmetros de entrada, por se tratar da tensão mais elevada obtida no ensaio de adensamento, que mais se aproximaria das tensões reais da pilha.

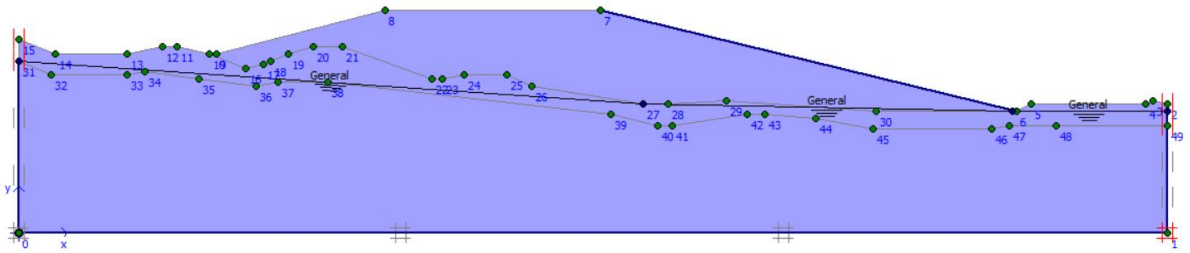
Figura 15: Geometria da pilha de RMFF



Fonte: Autor (2026)

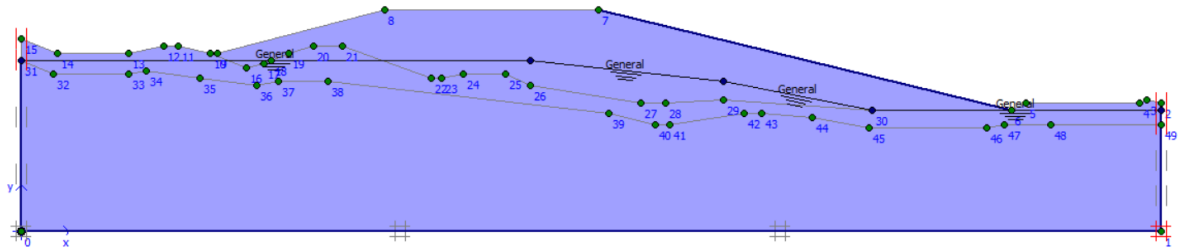
A pilha apresenta condições de contorno com apoio de primeiro grau, isto é, os apoios na base da pilha restringem o movimento no sentido vertical e permitem no sentido horizontal. Já os apoios nas laterais restringem o movimento no sentido horizontal, mas permitem no sentido vertical. Além da geometria, as duas condições de nível d'água (normal e crítico) também foram replicadas, como pode ser verificado nas Figura 16 e Figura 17.

Figura 16: Condição de NA normal para análise no *Plaxis 2D*



Fonte: Autor (2026)

Figura 17: Condição de NA crítico para análise no *Plaxis 2D*



Fonte: Autor (2026)

A Tabela 5 a seguir traz um resumo de todas as situações analisadas nesta etapa.

Tabela 5: Situações analisadas nas simulações computacionais no *Plaxis 2D*

Simulação	GC previsto (%)	NA
1	100	Normal
2	100	Crítico
3	95	Normal
4	95	Crítico
5	90	Normal
6	90	Crítico

Fonte: Autor (2026)

Os parâmetros de entrada para cada GC de foram definidos com base nos resultados do ensaio de cisalhamento direto e adensamento oedométrico. Já os parâmetros de entrada para a

camada de solo natural e substrato rochoso foram definidos hipoteticamente, considerando-se apenas a faixa disponível na literatura e manuais de *software*, conforme He *et al.* (2023), Villeneuve e Heap (2021) e *Fine Software* (2025). A seguir, tem-se a Tabela 6, que traz o resumo com os parâmetros de entrada. Ressalta-se que o coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,3.

Tabela 6: Resumo dos parâmetros de entrada no *software Plaxis 2D* para cada GC

GC_{real} (%)	γ_d (kN/m³)	c (kPa)	Φ (°)	E_{oed} (MPa)	k (m/s)
99	20,6	9,8	33,3	14,81	2,73x10 ⁻⁸
93	19,2	1,8	30,5	13,14	9,05x10 ⁻⁶
88	18,3	1,4	29,9	12,38	3,70x10 ⁻⁵
Solo natural	20	1	20	50	1,00x10 ⁻⁸
Substrato rochoso	25	100	35	1000	0

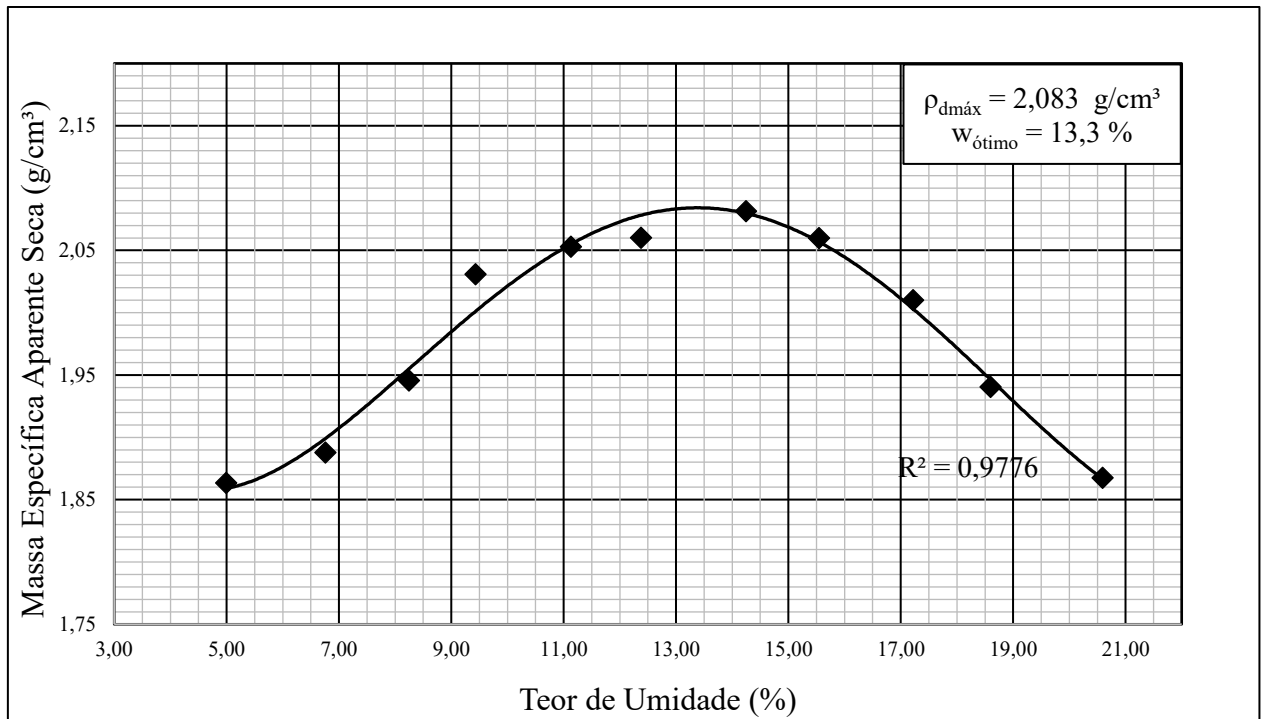
Fonte: Autor (2026)

A massa específica dos grãos encontrada foi de 3,434 g/cm³ (Tabela 7). O resultado encontra-se próximo daqueles encontrados por Machado (2022), Carneiro *et al.* (2023), Venturin (2022), Gomes *et al.* (2019), Balbino (2022) e Cândido (2023).

Em relação aos limites de consistência, o material foi classificado como não-plástico por não ter sido possível moldar o corpo de prova de RMFF para obtenção do LP conforme a NBR 7180 (ABNT, 2025c). Por sua vez, o limite de liquidez encontrado foi de 20%. Estes resultados são similares àqueles encontrados por Machado (2022), Carneiro *et al.* (2023), Balbino (2022), Venturin (2022) e Cândido (2023).

No que concerne à compactação do RMFF na Energia Proctor Normal, pode-se verificar a curva de 3^o grau correspondente na Figura 19. Os parâmetros de compactação obtidos, teor de umidade ótimo ($w_{\text{ótimo}}$) e massa específica aparente seca máxima ($\rho_{\text{dmáx}}$), foram iguais a 13,3% e 2,083 g/cm³, respectivamente. Os resultados encontram-se próximos daqueles encontrados por Cândido (2023), Machado (2022), Carneiro *et al.* (2023), e Venturin (2022).

Figura 19: Curva de compactação Proctor Normal do RMFF



Fonte: Autor (2026)

A Tabela 7 traz um resumo dos resultados da composição granulométrica, massa específica real dos grãos, limites de consistência, teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima obtidos para o RMFF.

Tabela 7: Composição granulométrica, massa específica dos grãos, limites de consistência e parâmetros de compactação do RMFF

Parâmetro	Resultado
Parcela de argila (%)	20
Parcela de silte (%)	55
Parcela de areia (%)	25
Parcela de pedregulho (%)	0
ρ_s (g/cm ³)	3,434
LL (%)	20
LP (%)	Não plástico
W _{ótimo} (%)	13,3
$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)	2,083

Fonte: Autor (2026)

4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado para o total de 18 corpos de prova, cujos dados dos ensaios foram previamente mencionados. Os dados de teor de umidade (w), massa específica aparente seca (ρ_d) e grau de compactação real (GC_{real}) dos corpos de prova ensaiados estão apresentados na Tabela 8, bem como os graus de compactação médios ($GC_{médio}$) e respectivos desvios-padrão (DP_{GC}).

Tabela 8: Dados de teor de umidade, massa específica aparente seca e grau de compactação dos corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento direto

Corpo de Prova	w (%)	ρ_d (g/cm³)	GC_{real} (%)	GC_{médio} (%)	DP_{GC} (%)
1	14,14	2,07	99,38		
2	14,14	2,05	98,42		
3	14,14	2,06	98,66		
4	13,37	2,05	98,19	99	0,43
5	13,37	2,06	98,37		
6	13,37	2,07	99,29		
7	12,91	1,93	92,63		
8	12,91	1,94	93,10		
9	12,91	1,92	92,18		
10	13,13	1,92	92,14	93	0,52
11	13,13	1,94	93,29		
12	13,13	1,92	92,12		
13	13,55	1,82	87,60		
14	13,55	1,81	87,45		
15	13,55	1,83	87,93		
16	13,40	1,82	87,60	88	0,27
17	13,20	1,84	88,18		
18	13,20	1,83	87,71		

Fonte: Autor (2026)

Destaca-se que os teores de umidade obtidos no processo de moldagem estão próximos e contidos dentro da variação máxima permitida de 1%. Além disso, os graus de compactação reais e as massas específicas aparentes secas obtidas foram validados pelo coeficiente de variação, tendo sido inferiores a 10% para todos os corpos de prova, como pode ser visualizado na Tabela 9.

Tabela 9: Coeficientes de variação dos parâmetros do processo de moldagem

GC _{médio} (%)	CV (%)	
	GC _{real}	ρ_d
99	0,46	0,39
93	0,51	0,63
88	0,28	0,53

Fonte: Autor (2026)

O tratamento dos dados da fase de ruptura do ensaio de cisalhamento direto permitiu o traçado das respectivas envoltórias de resistência ao cisalhamento do RMFF para cada um dos graus de compactação médio considerados na pesquisa. A Tabela 10 mostra os valores de tensões cisalhantes (τ) e normais (σ_n) obtidas para cada corpo de prova ensaiado. Os valores da Tabela 10 foram validados pelo coeficiente de variação, menores que 10% para as tensões normais corrigidas e as tensões cisalhantes de ruptura, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 10: Tensão normal e tensão cisalhante na ruptura para RMFF compactado

GC _{médio} (%)	Corpo de Prova	σ_n nominal (kPa)	σ_n (kPa)	τ (kPa)
99	1	200	215,17	164,00
	2	200	215,35	145,09
	3	400	442,64	297,06
	4	400	437,92	300,09
	5	100	106,90	75,61
	6	100	102,71	77,74
93	7	200	216,57	131,75
	8	200	218,28	125,06
	9	400	424,95	276,92
	10	400	440,77	239,68
	11	100	103,30	62,47
	12	100	103,46	64,03
88	13	200	213,58	157,87
	14	200	225,55	151,96
	15	400	441,84	255,50
	16	400	431,75	230,58
	17	100	108,50	43,75
	18	100	101,48	44,15

Fonte: Autor (2026)

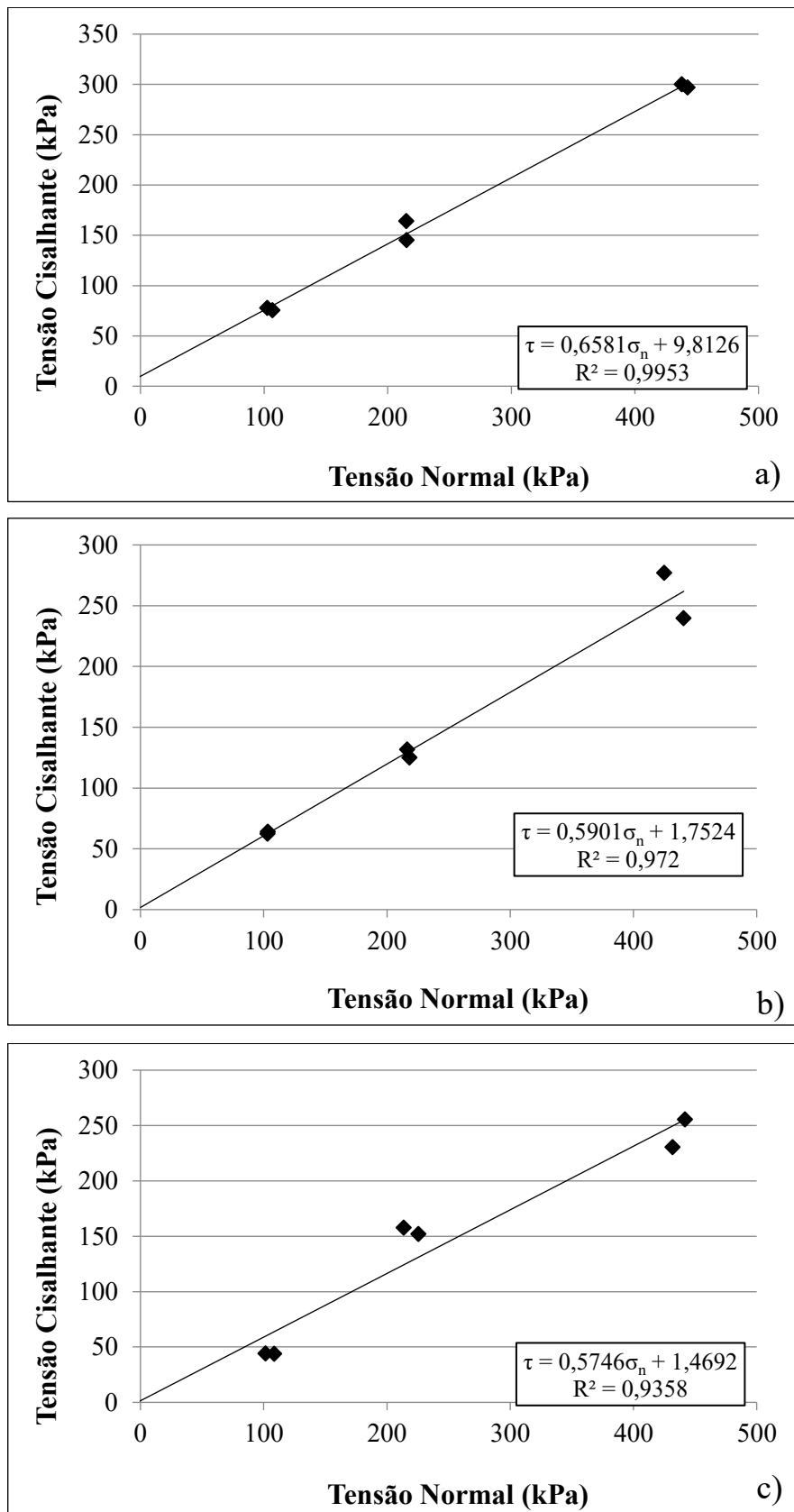
Tabela 11: Verificação do critério de aprovação dos CPs submetidos ao ensaio de cisalhamento direto

GC _{médio} (%)	σ_n nominal (kPa)	CV (%)	
		σ_n	τ
99	200	0,04	6,12
	400	0,54	0,51
	100	1,99	1,39
93	200	0,39	2,60
	400	1,83	7,21
	100	0,08	1,23
88	200	2,73	1,91
	400	1,16	5,13
	100	3,34	0,46

Fonte: Autor (2026)

Por fim, a Figura 20 mostra as envoltórias de resistência ao cisalhamento para cada grau de compactação médio do RMFF.

Figura 20: Envoltória de resistência ao cisalhamento do RMFF compactado: (a) $GC_{\text{médio}} = 99\%$, (b) $GC_{\text{médio}} = 93\%$ e (c) $GC_{\text{médio}} = 88\%$,



Fonte: Autor (2026)

De posse dos graus de compactação médios ($GC_{\text{médio}}$) dos corpos de prova, calcularam-se, também, as massas específicas aparentes secas médias para serem apresentadas na Tabela 12 com o resumo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do RMFF compactado. Destaca-se que os referidos parâmetros se fazem necessários porque serão fornecidos como dados de entrada nos *softwares* de simulação computacional *Slide2* e *Plaxis 2D*.

Tabela 12: Parâmetros de resistência ao cisalhamento para cada $GC_{\text{médio}}$

$GC_{\text{médio}}$ (%)	ρ_d média (g/cm^3)	c (kPa)	Φ (°)
99	2,06	9,8	33,3
93	1,92	1,8	30,5
88	1,83	1,4	29,9

Fonte: Autor (2026)

Amoah (2019), Carneiro (2020), Cândido (2023), Balbino (2022) e Machado (2022) estudaram o rejeito de minério de ferro com grau de compactação na Energia Proctor Normal igual a 100%. Tais resultados apresentam valores da mesma ordem de grandeza quando comparados ao grau de compactação de 99% analisado nesta pesquisa, o qual apresentou coesão efetiva de 9,80 kPa e ângulo de atrito de 33,3°. A Tabela 13 traz um resumo das referências de parâmetros de resistência ao cisalhamento das pesquisas usadas para comparação.

Tabela 13: Referências para comparação de parâmetros de resistência ao cisalhamento

Autor	Método de ensaio	c (kPa)	Φ (°)
Amoah (2019)	Cisalhamento direto	8,00	35,5
Carneiro (2020)	Cisalhamento direto	8,75	31,0
Cândido (2023)	Cisalhamento direto	13,10	33,8
Balbino (2022)	Triaxial	6,00	30,0
Machado (2022)	Triaxial	2,53	32,0

Fonte: Autor (2026)

Para os graus de compactação de 93% e 88%, os resultados apresentaram-se com comportamento similar àquele observado por Consoli *et al.* (2022). Após analisarem diferentes graus de compactação de um rejeito de minério de ferro, os autores encontraram um aumento de quase o dobro na coesão efetiva após aumentar-se o grau de compactação de 89% para 99%.

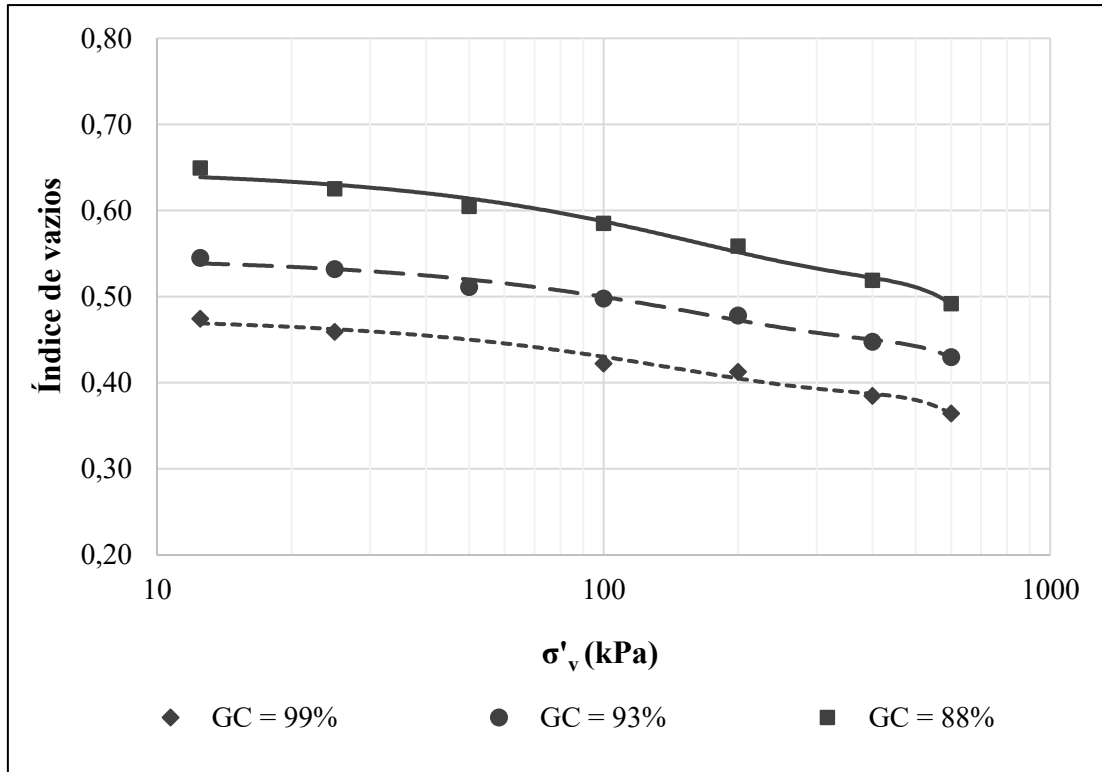
Já para o ângulo de atrito, os autores não encontraram grandes variações, como é o caso da presente pesquisa.

Os resultados do ensaio de cisalhamento, em geral, apresentam-se condizentes com a literatura e com o que era esperado, isto é, parâmetros de coesão efetiva, ângulo de atrito e massa específica aparente seca maiores à medida que se aumenta o grau de compactação do RMFF, gerando um aumento na resistência ao cisalhamento. Para esta pesquisa, com o aumento do GC de 88% para 99%, a coesão efetiva aumentou em mais de 5 vezes, enquanto o ângulo de atrito aumentou em 10%.

Isso pode ser explicado pelo aumento do número de contatos interparticulares e pela redução do índice de vazios associada a maiores graus de compactação, o que intensifica o atrito e o intertravamento entre as partículas sólidas do rejeito. Esse rearranjo estrutural contribui para o desenvolvimento de uma coesão aparente mais elevada, decorrente da maior restrição ao deslocamento relativo das partículas, enquanto o ângulo de atrito tende a apresentar variações menos expressivas, sobretudo em materiais granulares ou silto-arenosos, como observado por Consoli *et al.* (2022) e discutido por Mitchell *et al.* (2025).

4.3 ENSAIOS DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO E DE PERMEABILIDADE

O ensaio de adensamento oedométrico foi realizado para três corpos de prova, estando cada um deles com os respectivos graus de compactação reais (GC_{real}) de 99%, 93% e 88%. Inicialmente, foram traçadas as curvas de adensamento para cada GC_{real} . Em sequência, esses resultados dos ensaios permitiram determinar os valores de módulo de elasticidade oedométrico (E_{oed}), em MPa, e de permeabilidade (k), em m/s, os quais podem ser verificados na Tabela 14. A Figura 21 traz as curvas de adensamento para cada GC_{real} analisado. A Figura 22 mostra as curvas para cada GC_{real} com a tendência de comportamento do E_{oed} em função da tensão vertical efetiva (σ'_v). Por fim, a Figura 23 mostra as curvas de tensão vertical efetiva versus coeficiente de permeabilidade para cada GC analisado.

Figura 21: Curvas de adensamento para cada GC_{real} 

Fonte: Autor (2026)

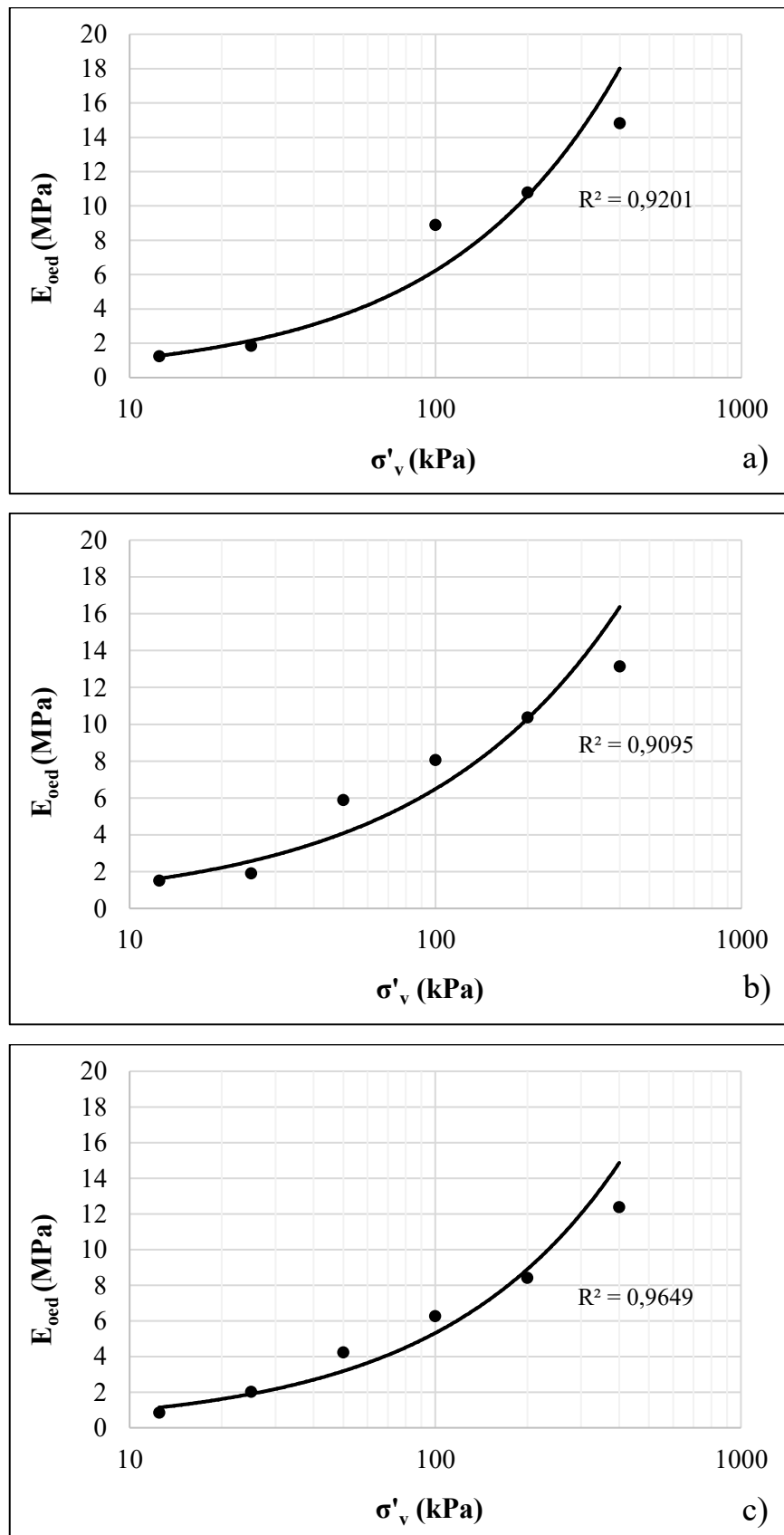
Verificou-se que GCs maiores apresentam menores índices de vazios, comportamento esperado, visto que GCs maiores apresentam uma menor massa específica aparente seca. Em comparação ao GC de 99%, os GCs de 93% e 88% apresentaram uma redução média no índice de vazios de 15% e 26%, respectivamente.

Tabela 14: Valores do E_{oed} , coeficiente de permeabilidade, teor de umidade e massa específica aparente seca para cada corpo de prova ensaiado, em função do GC_{real} e da tensão vertical aplicada

GC_{real} (%)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	σ'_v (kPa)	E_{oed} (MPa)	k (m/s)
99	13,42	2,06	12,5	1,24	$5,21 \times 10^{-8}$
			25	1,86	$5,77 \times 10^{-8}$
			100	8,89	$5,55 \times 10^{-8}$
			200	10,78	$2,59 \times 10^{-8}$
			400	14,81	$2,73 \times 10^{-8}$
93	13,50	1,92	12,5	1,52	$1,07 \times 10^{-5}$
			25	1,91	$9,27 \times 10^{-6}$
			50	5,88	$9,36 \times 10^{-6}$
			100	8,06	$9,70 \times 10^{-6}$
			200	10,36	$9,28 \times 10^{-6}$
88	13,48	1,83	12,5	0,86	$5,21 \times 10^{-5}$
			25	2,02	$5,51 \times 10^{-5}$
			50	4,24	$4,57 \times 10^{-5}$
			100	6,27	$4,83 \times 10^{-5}$
			200	8,42	$4,34 \times 10^{-5}$
			400	12,38	$3,70 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2026)

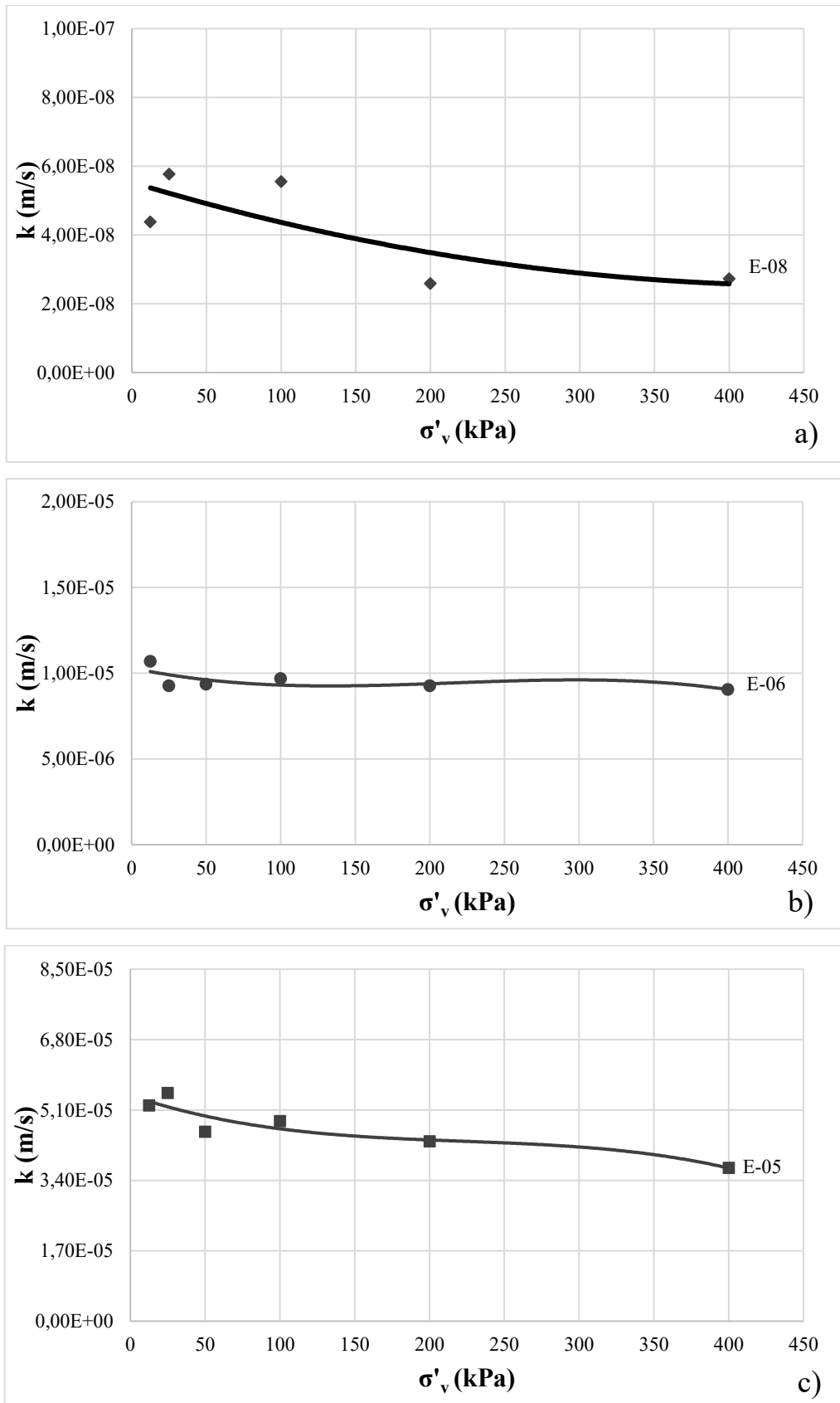
Figura 22: Curvas Tensão vertical efetiva x E_{oed} : (a) $GC_{real} = 99\%$, (b) $GC_{real} = 93\%$ e (c) $GC_{real} = 88\%$



Fonte: Autor (2026)

Figura 23: Curvas Tensão vertical efetiva x Coeficiente de permeabilidade:

(a) $GC_{real} = 99\%$, (b) $GC_{real} = 93\%$ e (c) $GC_{real} = 88\%$



Fonte: Autor (2026)

Ao avaliar os resultados obtidos para o E_{oed} (Tabela 14) em relação aos graus de compactação, notou-se que, quanto maior o GC, maior o E_{oed} do RMFF. Para esta pesquisa, ao se aumentar o GC de 88% para 99%, o E_{oed} sofreu uma variação positiva de até 30% para diferentes níveis de tensão. Esse comportamento é atribuído à redução do índice de vazios e ao aumento do número e da área de contatos interparticulares associados a maiores graus de compactação, o que eleva a rigidez do esqueleto sólido do rejeito. Como consequência, há maior mobilização das tensões de contato e menor rearranjo estrutural das partículas sob carregamento unidimensional, resultando em valores mais elevados de E_{oed} e em menor susceptibilidade a deformações e deslocamentos (Mitchell *et al.*, 2025).

Por outro lado, verifica-se um comportamento inverso ao analisar os resultados para o k (Tabela 14), indicando menor k do RMFF quanto maior for o GC, comportamento também esperado, visto que GCs menores possuem maior índice de vazios, o que permite um maior fluxo de água através do mesmo corpo de prova (Venturin, 2022). Para esta pesquisa, o k sofreu um aumento da ordem de 10^3 quando o GC foi aumentado de 88% até 99%.

Ao comparar a faixa de valores do E_{oed} obtidos nesta pesquisa para RMFF com GC_{real} de 99% (1 MPa a 15 MPa), na Tabela 14, com aquela encontrada por Cândido (2023) para o GC de 100% (1 MPa a 6 MPa) através do mesmo ensaio, nota-se similar ordem de grandeza. Adicionalmente, Rógenes *et al.* (2024) encontraram, a partir do tratamento de dados do trabalho de Arroyo e Gens (2021), um valor de E_{oed} de 13,40 MPa para um RMFF com granulometria predominante de silte e tensões efetivas médias de 800 kPa, valor este similar ao encontrado na presente pesquisa para 400 kPa.

Devido à escassez de dados de E_{oed} para rejeitos na literatura, os resultados de E_{oed} foram comparados com pesquisas de materiais que apresentaram granulometria e processo de compactação similares. Meyer e Olszewska (2021) encontraram, em sua revisão bibliográfica, uma faixa entre 10 e 60 MPa para o E_{oed} de materiais siltosos compactados também na Energia Proctor Normal. Illés *et al.* (2022) obtiveram uma faixa de E_{oed} variando de 5,30 a 38,46 MPa também para um solo siltoso através de ensaio de adensamento nas tensões verticais variando de 100 a 600 kPa. Jalalichi *et al.* (2025) encontraram, através de um método numérico-experimental, E_{oed} de 8,70 MPa em um rejeito de estéril de granulometria siltosa e compactado na energia PN.

Além da rigidez, a análise dos coeficientes de permeabilidade evidencia uma relação inversa clara entre grau de compactação e condutividade hidráulica. O RMFF compactado a 99% apresentou coeficientes de permeabilidade na ordem de 10^{-8} m/s, enquanto os valores para 93% situaram-se em torno de 10^{-6} m/s e, para 88%, atingiram a ordem de 10^{-5} m/s. Essa redução

expressiva da permeabilidade com o aumento do grau de compactação está diretamente relacionada à diminuição do volume de vazios e à menor conectividade dos poros, o que restringe o fluxo de água através do maciço (Mitchel *et al.*, 2025).

O coeficiente de permeabilidade para rejeitos de minério de ferro possui uma alta variabilidade, conforme pode ser verificado nos trabalhos de Carneiro (2020), Machado (2022), Cândido (2023) e Dias Neto *et al.* (2024), que encontraram valores para o coeficiente de permeabilidade de diferentes RMFFs com GC de 100% compactados na energia PN. Além disso, Venturin (2022) e Carneiro *et al.* (2023) analisaram o coeficiente de permeabilidade (k) para RMFF compactados em diferentes GCs, que também apresentaram alta variabilidade.

Dessa forma, verificou-se que a faixa para valores de k encontrados para o RMFF nesta pesquisa (10^{-5} a 10^{-8} m/s) (Figura 23) está de acordo com a literatura, conforme pode ser melhor visualizado na Tabela 15, que resume os resultados de coeficiente de permeabilidade das referências utilizadas para comparação.

Tabela 15: Referências para comparação de coeficientes de permeabilidade

Autor	GC (%)	k (m/s)
Carneiro (2020)	100	$2,96 \times 10^{-5}$
Machado (2022)	100	$1,32 \times 10^{-6}$ a $5,73 \times 10^{-6}$
Cândido (2023)	100	10^{-6} a 10^{-5}
Dias Neto (2024)	100	10^{-8} a 10^{-6}
Venturin (2022)	93, 95, 97, 100	$9,65 \times 10^{-8}$ a $4,10 \times 10^{-7}$
Carneiro <i>et al.</i> (2024)	93, 95, 97, 100	$6,23 \times 10^{-8}$ a $4,10 \times 10^{-7}$

Fonte: Autor (2026)

4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO *SOFTWARE SLIDE2*

Após a simulação no *software Slide2*, foi realizado um comparativo dos valores de FS obtidos para cada caso específico das Tabela 2 e Tabela 3. A Tabela 16 traz um resumo dos resultados das análises da primeira rodada, e a Tabela 17, dos resultados das análises da segunda rodada. A Figura 24 traz gráficos comparativos para melhor visualização dos resultados. Por fim, a Figura 25 traz um exemplo de resultado de análise extraído do *software* (especificamente para GC = 99%, I = 32° e NA crítico), enquanto os FS referentes ao método Morgenstern-Price para cada caso específico das Tabela 2 e Tabela 3 encontram-se no Anexo A, ao fim do texto.

Tabela 16: Resumo dos resultados das análises de primeira rodada no *software Slide2*

Simulação	GC (%)	I (°)	NA	Direção do movimento	FS	
1	99	32	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	1,82
					Morg./Price	1,80
					Janbu	1,84
2	99	32	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	1,94
					Morg./Price	1,93
					Janbu	1,96
3	93	32	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	1,71
					Morg./Price	1,70
					Janbu	1,72
4	93	32	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	1,84
					Morg./Price	1,83
					Janbu	1,85
5	88	32	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	1,71
					Morg./Price	1,69
					Janbu	1,72
6	88	32	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	1,84
					Morg./Price	1,82
					Janbu	1,84
7	99	32	Crítico	Direita-Esquerda	Bishop	1,71
					Morg./Price	1,70
					Janbu	1,64
8	99	32	Normal	Direita-Esquerda	Bishop	2,15
					Morg./Price	2,05
					Janbu	2,13
9	93	32	Crítico	Direita-Esquerda	Bishop	1,63
					Morg./Price	1,57
					Janbu	1,63
10	93	32	Normal	Direita-Esquerda	Bishop	2,07
					Morg./Price	1,99
					Janbu	2,06
11	88	32	Crítico	Direita-Esquerda	Bishop	1,62
					Morg./Price	1,56
					Janbu	1,61
12	88	32	Normal	Direita-Esquerda	Bishop	2,07
					Morg./Price	1,99
					Janbu	2,06

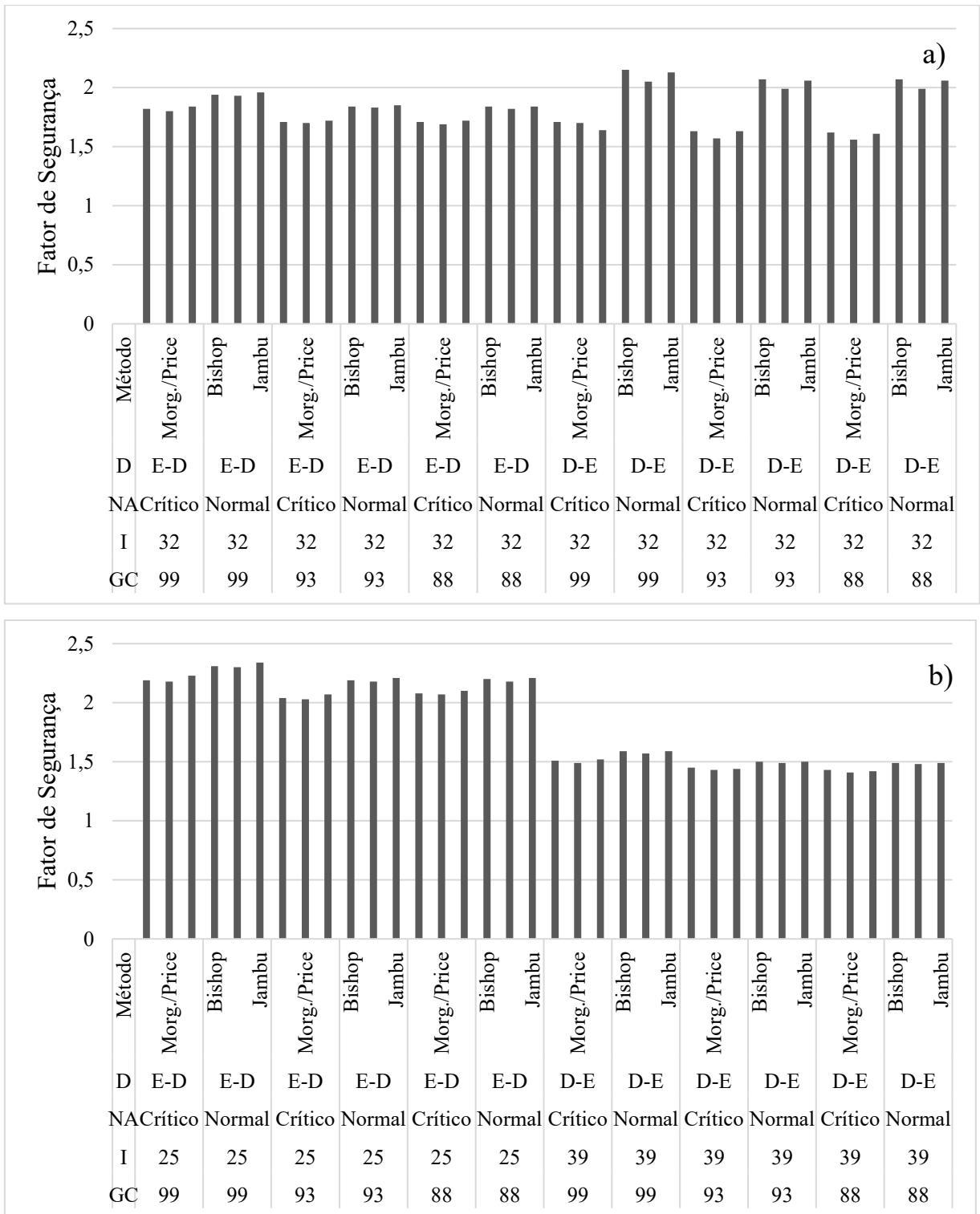
Fonte: Autor (2026)

Tabela 17: Resumo dos resultados das análises de segunda rodada no *software Slide2*

Simulação	GC (%)	I (°)	NA	Direção do movimento	FS	
13	99	25	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	2,19
					Morg./Price	2,18
					Janbu	2,23
14	99	25	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	2,31
					Morg./Price	2,30
					Janbu	2,34
15	93	25	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	2,04
					Morg./Price	2,03
					Janbu	2,07
16	93	25	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	2,19
					Morg./Price	2,18
					Janbu	2,21
17	88	25	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	2,08
					Morg./Price	2,07
					Janbu	2,10
18	88	25	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	2,20
					Morg./Price	2,18
					Janbu	2,21
19	99	39	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	1,51
					Morg./Price	1,49
					Janbu	1,52
20	99	39	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	1,59
					Morg./Price	1,57
					Janbu	1,59
21	93	39	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	1,45
					Morg./Price	1,43
					Janbu	1,44
22	93	39	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	1,50
					Morg./Price	1,49
					Janbu	1,50
23	88	39	Crítico	Esquerda-Direita	Bishop	1,43
					Morg./Price	1,41
					Janbu	1,42
24	88	39	Normal	Esquerda-Direita	Bishop	1,49
					Morg./Price	1,48
					Janbu	1,49

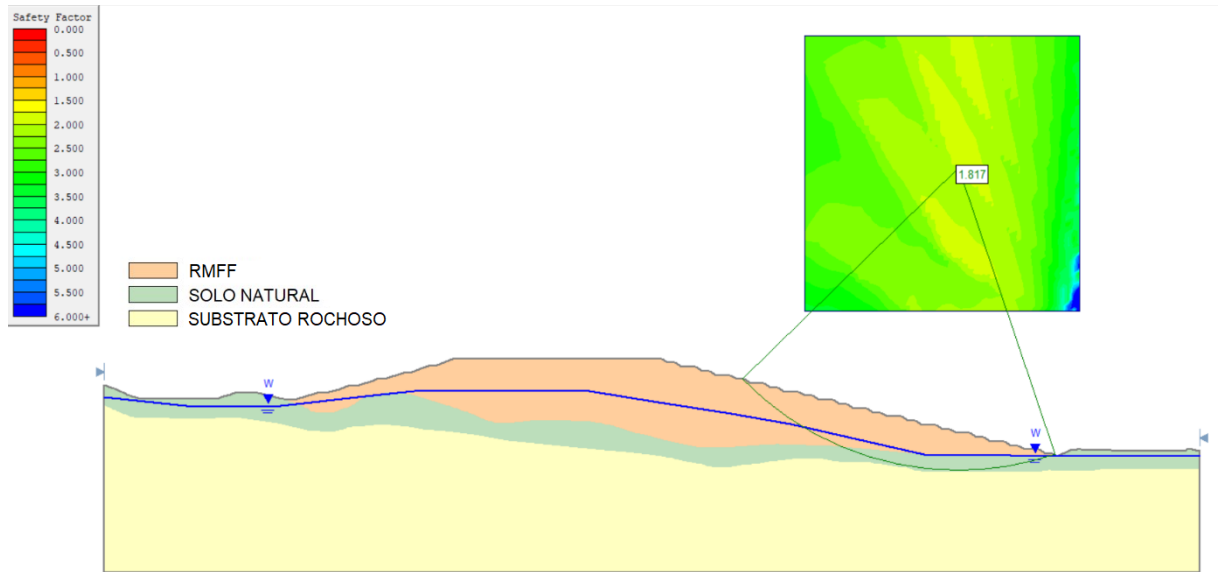
Fonte: Autor (2026)

Figura 24: Gráfico comparativo: (a) resultados das análises de primeira rodada e (b) resultados das análises de segunda rodada no *software Slide2*



Fonte: Autor (2026)

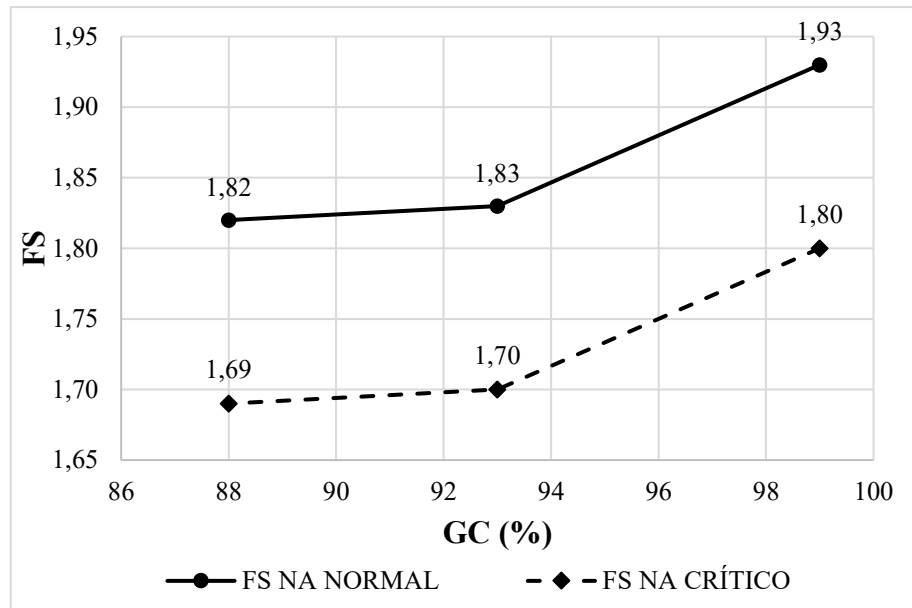
Figura 25: FS para GC=99%, I= 32° e NA crítico



Fonte: Autor (2026)

Os resultados obtidos a partir das simulações computacionais realizadas no *software Slide2* evidenciam a influência significativa dos parâmetros geotécnicos e geométricos analisados (grau de compactação, inclinação da pilha, condição do nível d'água e direção do movimento de ruptura) sobre os valores do FS. Também evidenciam a existência de situações com GCs inferiores que resultaram em FS superiores em até 45% em relação ao FS de 1,5, usualmente considerado crítico pela NBR 13029 (ABNT, 2024b).

De modo geral, observa-se que a condição de nível d'água crítico conduz sistematicamente a valores inferiores de FS quando comparada à condição de nível d'água normal, independentemente do método de cálculo adotado (Bishop, Morgenstern-Price ou Janbu). Essa tendência pode ser visualizada na Figura 26, que traz gráficos comparativos do FS para diferentes GC e NA para uma inclinação fixa de 32°. Ressalta-se que essa tendência também foi verificada para as inclinações de 25° e 39°.

Figura 26: FS x GC em função do NA ($I = 32^\circ$)

Fonte: Autor (2026)

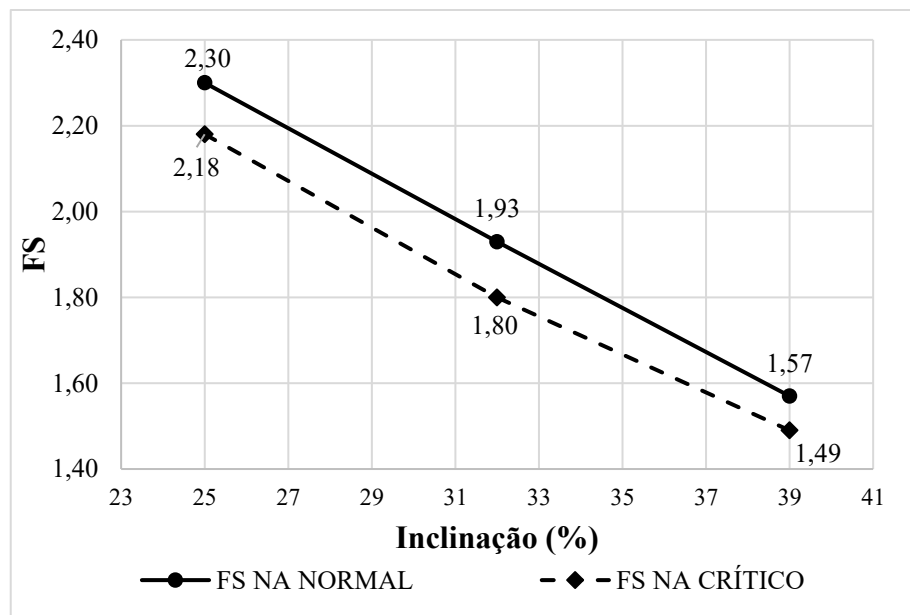
Esse comportamento era esperado do ponto de vista geotécnico, uma vez que a elevação do nível d'água resulta no aumento das pressões neutras ao longo da superfície potencial de ruptura, reduzindo as tensões efetivas mobilizadas e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do maciço (Mitchel *et al.*, 2025). A diferença entre os valores de FS nas condições de nível d'água crítico e normal é mais expressiva nos cenários de maior inclinação da pilha (da ordem de 7% para a inclinação de 39° e 5% para a inclinação de 25°), indicando um efeito combinado entre geometria desfavorável e condições hidrológicas adversas. Além disso, para recorte de GCs analisados, verificou-se uma maior influência do NA no FS quando comparado ao GC, visto que o NA crítico apresentou fatores de segurança menores independentemente do GC.

A análise comparativa entre os diferentes graus de compactação (99%, 93% e 88%) na Figura 26 revela uma redução progressiva do FS à medida que o GC diminui. Para uma mesma inclinação do talude, direção de análise e condição de nível d'água, os maiores valores de FS são sistematicamente associados ao GC de 99%, enquanto os menores valores concentram-se nos cenários com GC de 88%. Verificou-se que, para a condição de NA normal e inclinação de 32° , o FS reduziu em, aproximadamente, 5% quando se reduziu o GC de 99% para 93% e 88%. Já para a condição de NA normal e inclinação de 32° , o FS reduziu em, aproximadamente, 6%. Ressalta-se que essa tendência também foi repetida foi observada nas inclinações de 25° e 39° .

Esse comportamento indica que a redução do grau de compactação impacta negativamente os parâmetros de resistência do material, especialmente a coesão e o ângulo de atrito efetivo, refletindo-se diretamente na estabilidade global da pilha. Embora as diferenças absolutas de FS entre os níveis de compactação não sejam abruptas em todos os casos da Figura 24, observa-se que, em cenários já próximos a limites de segurança, como aqueles com maiores inclinações e nível d'água crítico, essa redução pode ser determinante para a classificação do estado de estabilidade da estrutura.

A comparação entre os diferentes ângulos de inclinação avaliados na segunda rodada (25°, 32° e 39°) evidencia de forma clara a sensibilidade do FS à geometria do talude. Os maiores valores de FS são obtidos para a inclinação de 25°, enquanto os menores valores concentram-se nos cenários com inclinação de 39°, conforme apresentado na Figura 27, que compara os FS obtidos para diferentes inclinações e NA para o GC fixo de 99%. Ressalta-se que essa tendência também foi verificada para os GC de 93% e 88%.

Figura 27: FS x Inclinação em função do NA (GC = 99%)



Fonte: Autor (2026)

Para a inclinação de 25°, mesmo sob condição de NA crítico, os valores de FS permanecem relativamente elevados, com valores que superam em 11% e 28% os FS sob NA normal para as inclinações de 32° e 39°, respectivamente, indicando uma condição global de maior estabilidade. Ressalta-se ainda que, para a inclinação de 39°, os valores de FS aproximam-se ou são inferiores ao limite de 1,5 usualmente considerados críticos em projetos

geotécnicos segundo a NBR 13029 (ABNT, 2024b), sobretudo quando associados a nível d'água crítico e GC reduzido. Esses resultados confirmam a importância do controle geométrico da pilha como uma das principais estratégias de mitigação de riscos associados à instabilidade.

A comparação entre os métodos de Bishop, Morgenstern-Price e Janbu demonstra uma boa concordância geral entre os resultados, com diferenças relativamente pequenas nos valores absolutos de FS. De forma recorrente, o método de Janbu tende a fornecer valores ligeiramente superiores, enquanto o método de Morgenstern-Price apresenta valores ligeiramente inferiores em diversos cenários por se tratar de um método com menos simplificações e mais preciso (Alok *et al.*, 2024). Apesar dessas diferenças, observa-se que as tendências globais são preservadas em todos os métodos, ou seja, variações de GC, inclinação, condição do nível d'água e direção de análise produzem efeitos consistentes sobre o FS independentemente do método adotado. Esse resultado confere maior robustez às conclusões extraídas das simulações realizadas.

De maneira integrada, os resultados indicam que a estabilidade da pilha analisada é fortemente condicionada por fatores geométricos e hidrológicos, sendo o nível d'água e a inclinação os parâmetros de maior impacto sobre o FS. O grau de compactação exerce influência direta na estabilidade da pilha quando analisado isoladamente e torna-se crítico em cenários desfavoráveis, potencializando a redução do FS. No entanto, a combinação com os outros fatores mencionados anteriormente pode garantir a estabilidade de uma pilha, até mesmo com graus de compactação inferiores.

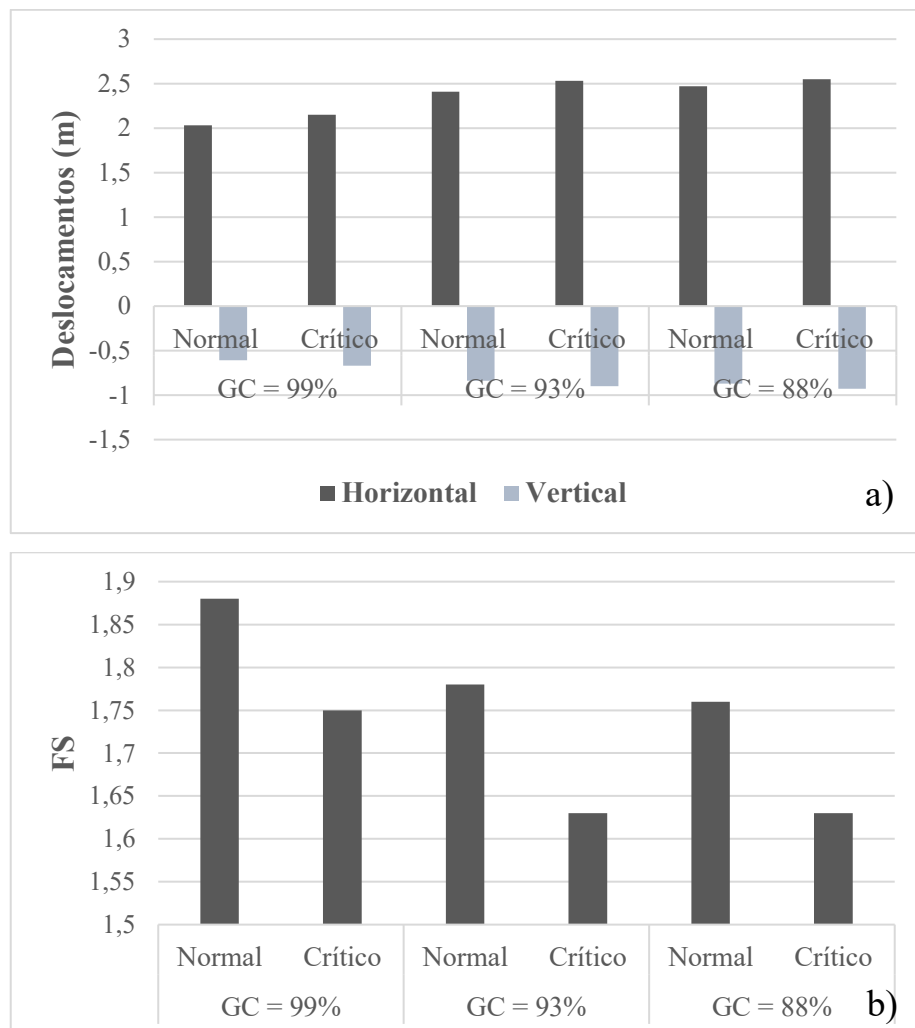
4.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO *SOFTWARE PLAXIS 2D*

Após a simulação no *software Plaxis 2D*, foram realizadas comparações entre os deslocamentos e pontos com maior tendência à plastificação para cada caso específico mencionado na Tabela 5. A Tabela 18 traz um resumo dos resultados numéricos. A Figura 28 traz gráficos comparativos que melhor ilustram os resultados dos deslocamentos (a) e fatores de segurança (b).

Tabela 18: Resumo dos resultados das simulações no *software Plaxis 2D*

GC _{real} (%)	NA	Deslocamento	Deslocamento	FS
		Horizontal (m)	vertical (m)	
99	Normal	2,03	-0,61	1,88
99	Crítico	2,15	-0,67	1,75
93	Normal	2,41	-0,84	1,78
93	Crítico	2,53	-0,90	1,63
88	Normal	2,47	-0,87	1,76
88	Crítico	2,55	-0,93	1,63

Fonte: Autor (2026)

Figura 28: Gráfico comparativo: (a) resultados das análises de deslocamentos e (b) FS no *Plaxis 2D*

Fonte: Autor (2026)

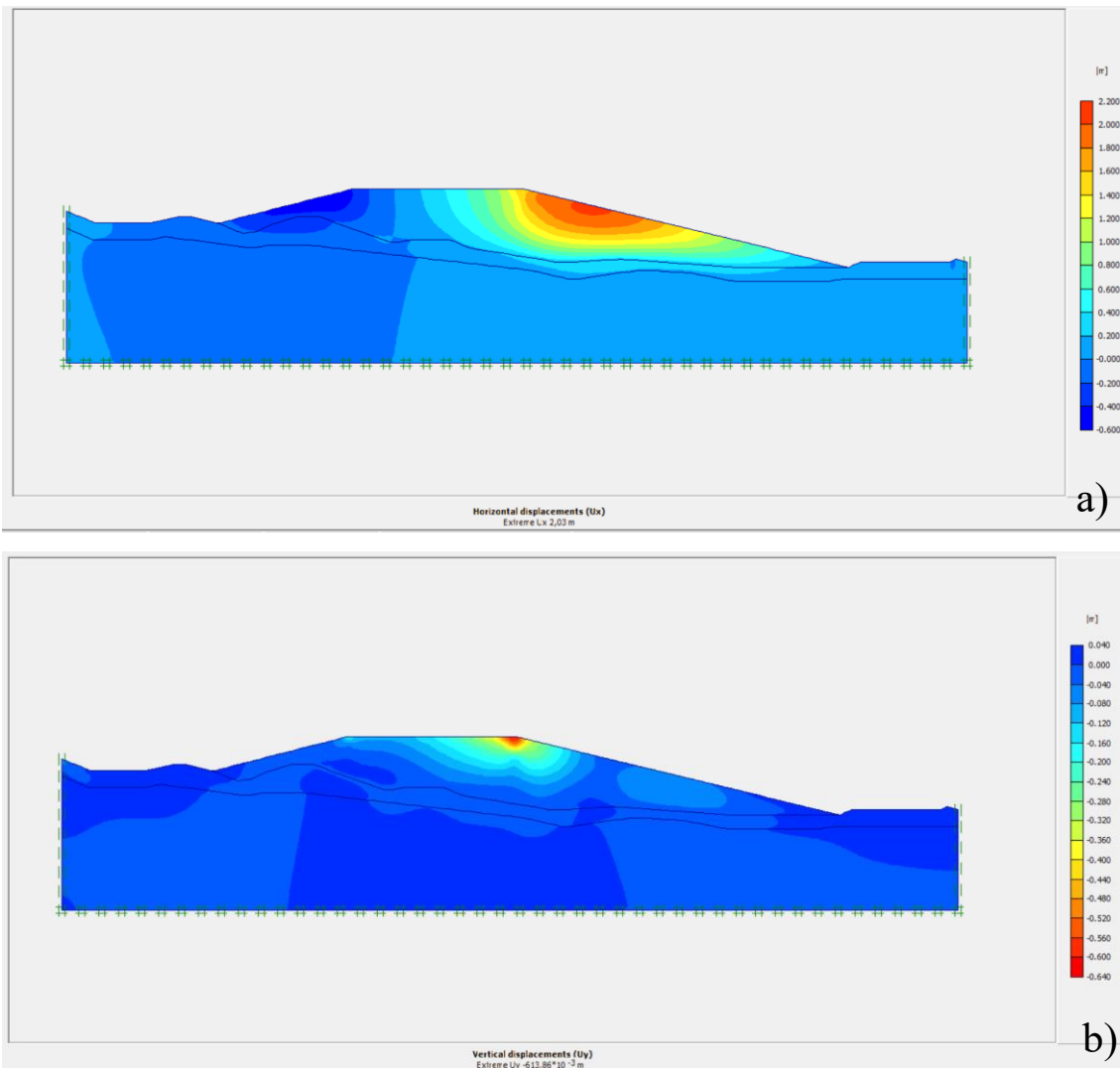
Os resultados indicam que os deslocamentos horizontais foram positivos, ou seja, representam um movimento do RMFF para a direita da pilha. No que tange aos deslocamentos verticais, os resultados foram negativos, representando um movimento de recalque a favor da gravidade. Verifica-se que os deslocamentos são maiores em graus de compactação menores.

No tocante aos fatores de segurança, os valores obtidos foram bem próximos aos obtidos através da análise em método de equilíbrio limite no *Slide2*, com uma variação na ordem de apenas 3%. Dessa forma, a tendência de redução do FS à medida que se reduz o GC foi confirmada. O mesmo pode ser dito para a condição de NA crítico, que possui uma estabilidade menor que condições de NA normal.

Por fim, a Figura 29 traz um exemplo de resultados de análises extraídos do *Plaxis 2D* (especificamente para o GC igual a 99% e NA normal), apresentando os deslocamentos horizontais (a) e deslocamentos verticais (b), enquanto a Figura 30 traz os pontos de plastificação (a) e o fator de segurança (b). O acervo completo com todos os resultados da Tabela 18 encontram-se no Anexo B.

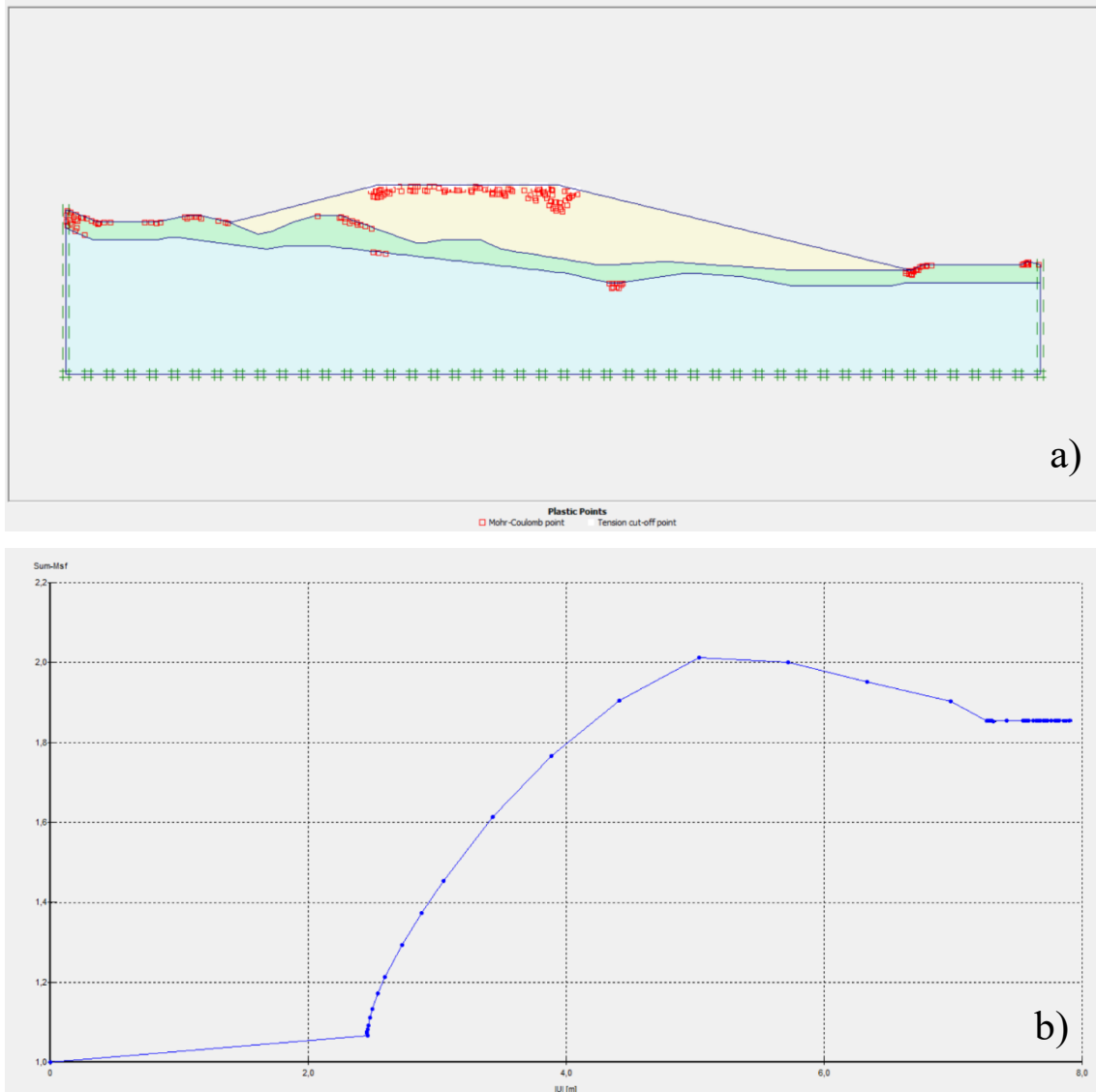
A partir da análise das imagens de presentes no Anexo B, notou-se que a tendência à plastificação é maior nos GCs menores, evidenciada pela maior quantidade de pontos de plastificação observada em GCs menores. Entretanto, ressalta-se que a condição de NA não exerceu influência significativa na susceptibilidade à plastificação da pilha.

Figura 29: Exemplo de resultados de simulação no *Plaxis 2D* para GC=99% e NA normal: (a) Deslocamentos horizontais e (b) Deslocamentos verticais



Fonte: Autor (2026)

Figura 30: Exemplo de resultados de simulação no *Plaxis 2D* para GC=99% e NA normal: (a) Pontos de plastificação e (b) Fator de segurança em função das operações acumuladas



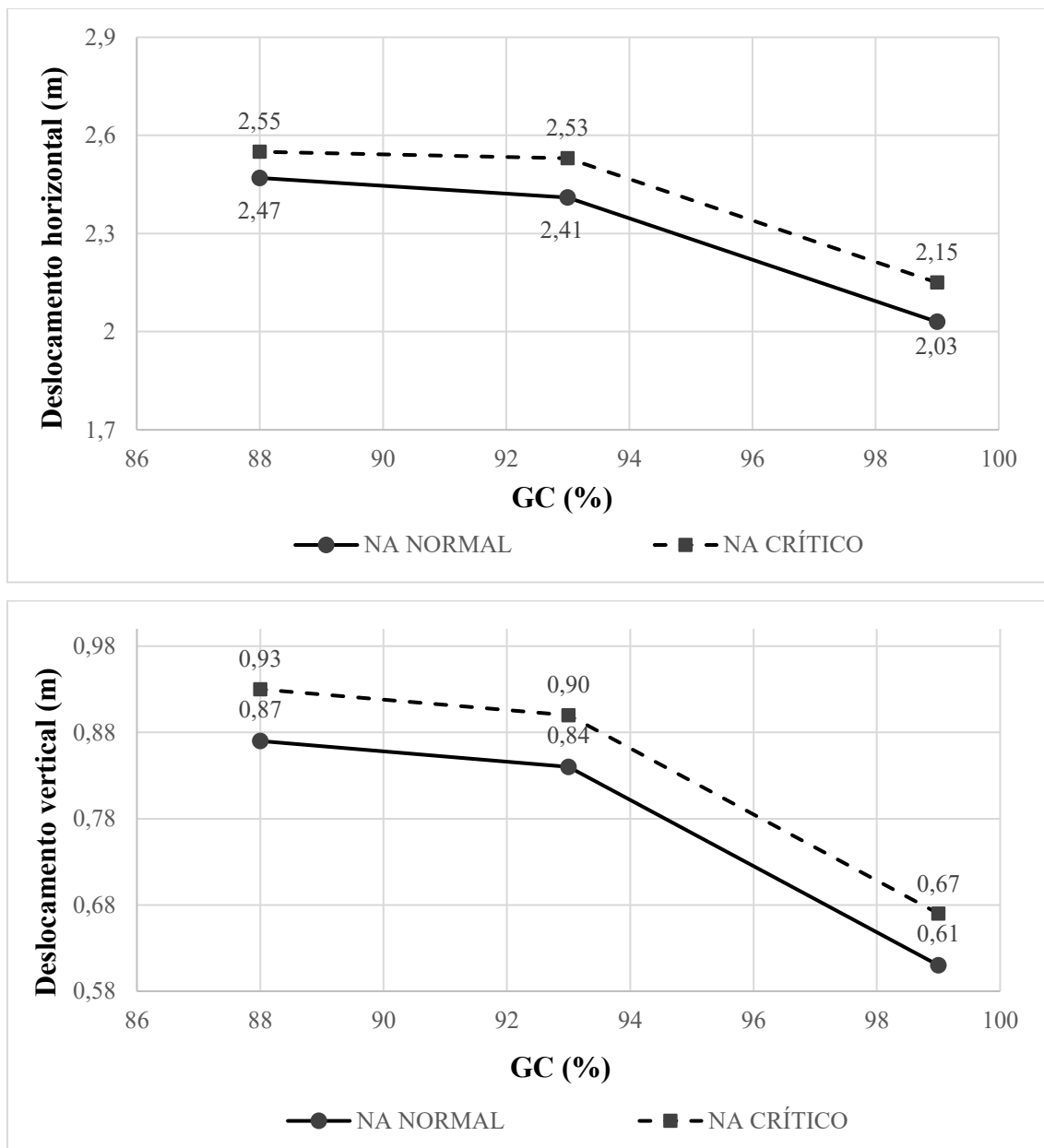
Fonte: Autor (2026)

De maneira geral, observa-se que os maiores deslocamentos, tanto horizontais quanto verticais, estão associados aos menores graus de compactação e às condições mais desfavoráveis de nível d'água devido à menor área de contato interparticular e maior presença de poropressão nessas condições. Para o grau de compactação de 88%, especialmente sob nível d'água crítico, foram registrados os maiores deslocamentos verticais, atingindo valores da ordem de $-0,93$ m, indicando uma maior deformabilidade global do maciço. Esses deslocamentos obtidos estão de acordo com a pesquisa de Winsa *et al.* (2025), que encontraram

deslocamentos verticais de até 1,10 m para uma pilha de rejeitos com 63,5 metros de altura compactada a 100% e sob nível d'água elevado.

Em contrapartida, o material compactado a 99% apresentou deslocamentos verticais e horizontais da ordem de 15% e 17% inferiores aos outros GCs sob nível d'água crítico e normal, respectivamente, evidenciando um comportamento mais rígido e estável. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 31, que traz os deslocamentos horizontais (a) e verticais (b) em função do GC e NA.

Figura 31: (a) Deslocamentos horizontais e (b) deslocamentos verticais em função do GC e NA



Fonte: Autor (2026)

A comparação entre os diferentes graus de compactação reforça a influência direta da densificação do solo na redução das deformações. Mesmo sob nível d'água crítico, o maciço compactado a 99% apresentou deslocamentos verticais 20% e 23% inferiores àqueles observados nos RMFF compactados a 93% e 88%, respectivamente, sob nível d'água normal. Tal comportamento é coerente com a literatura geotécnica, que associa uma estrutura do solo mais densa a menores índices de vazios e maior resistência à deformação (Sepúlveda *et al.*, 2022).

Essa tendência é explicada pelos resultados dos ensaios oedométricos apresentados na Tabela 14, pois o E_{oed} está diretamente relacionado com a rigidez do maciço e sua capacidade de resistir às deformações (Mitchel *et al.*, 2025). Verifica-se que os maiores valores de módulo de elasticidade oedométrico estão associados ao maior grau de compactação (99%), alcançando valores superiores a 14 MPa para um estágio de carregamento de 400 kPa. Em contraste, os materiais compactados a 93% e 88% apresentaram módulos ligeiramente inferiores, o que explica a maior magnitude dos deslocamentos observados nas simulações numéricas.

A menor permeabilidade observada nos materiais mais compactados também contribui para um comportamento mais favorável em termos de estabilidade global. Segundo Huang *et al.* (2022), a redução do fluxo de água que adentra a pilha e, conseqüentemente, das pressões neutras internas resulta em menores deformações e menor tendência à plastificação, aspecto refletido nos menores valores de deslocamentos obtidos nas simulações com maior grau de compactação.

Portanto, a associação entre maiores módulos oedométricos e menores coeficientes de permeabilidade para maiores graus de compactação explica de forma consistente os resultados numéricos obtidos no *Plaxis 2D*. Os dados indicam que o aumento do grau de compactação promove simultaneamente um ganho de rigidez do material e uma redução da sua susceptibilidade hidráulica, resultando em um desempenho geotécnico mais estável, mesmo em cenários críticos de nível d'água. Esses resultados reforçam a importância do controle tecnológico da compactação como medida fundamental para a segurança e o desempenho de obras geotécnicas.

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo analisar a estabilidade e deformabilidade de uma pilha de rejeito de minério de ferro para diferentes graus de compactação, bem como a influência do nível d'água e da geometria da pilha no fator de segurança, deslocamentos e pontos de plastificação. Aferiu-se que o trabalho realizado atingiu os objetivos esperados. A partir das análises experimentais e numéricas realizadas, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- O grau de compactação exerce influência direta nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, rigidez e permeabilidade do RMFF. Verificou-se que, à medida em que o GC aumenta de 88% para 99%, há um aumento correlato dos valores de coesão (mais de 5 vezes), ângulo de atrito (10%) e módulo oedométrico (até 30%), indicando maior resistência e rigidez do material. Para o coeficiente de permeabilidade, a relação observada foi a inversa: há um aumento da ordem de 10^3 vezes quando se reduz o GC;
- O grau de compactação exerce influência direta na estabilidade das pilhas, representada pelos fatores de segurança. De maneira geral, verificou-se que maiores graus de compactação correspondem a maiores fatores de segurança em até 6%. No que tange à geometria (representada pela inclinação das bermas), verificou-se um comportamento inverso: menores inclinações correspondem a fatores de segurança maiores em até 32%. No tocante ao nível d'água, verificou-se um aumento de até 7% para níveis d'água menores. Além disso, verificou-se que, para o grau de compactação de 99%, a estabilidade foi mantida para todas as inclinações analisadas, até 39°, inclusive sob condição de nível d'água crítico. Para o GC de 93%, a pilha permaneceu estável até a inclinação de 39°, exceto quando considerada a condição de nível d'água crítico. Já para o GC de 88%, a estabilidade foi observada apenas para inclinações de até 32°, sendo que, na inclinação de 39°, o fator de segurança indicou condição de instabilidade;
- O grau de compactação exerce influência direta na deformabilidade das pilhas, representada pelos deslocamentos e pontos susceptíveis à plastificação. De maneira geral, verificou-se que maiores graus de compactação resultam em menores deslocamentos horizontais (em até 17%) e verticais (em até 28%) e uma menor

tendência à plastificação. No que tange ao nível, d'água, a relação se inverte: deslocamentos maiores, em até 9%, são presentes em situações com maior NA, não havendo mudança significativa da quantidade de pontos de plastificação. Ressalta-se que o GC de 99% sob NA crítico apresentou deslocamentos inferiores em 11% e 13% aos GCs de 93% e 88% respectivamente, mesmo sob condições de NA normal. Isso demonstra que o GC influenciou mais os deslocamentos do que o NA;

- Os resultados e conclusões indicam que há margem para otimização entre segurança geotécnica e redução no grau de compactação, desde que seja feito o devido estudo integrado entre a geometria e condições de NA, sendo que cada pilha deve ser analisada de acordo com as suas particularidades. Foram observadas diversas combinações de GCs inferiores a 100%, geometrias e NA que tiveram pouco impacto nos deslocamentos e promoveram a estabilidade, com FS que superam o FS mínimo da NBR 13029 (ABNT, 2024b) em até 45%. Ressalta-se, ainda, que os rejeitos são materiais heterogêneos, cuja granulometria e composição podem variar de acordo com o processo de extração e localização geográfica, criando a necessidade de que se façam ensaios laboratoriais para cada caso específico.

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar a influência do grau de compactação em outros fenômenos geotécnicos relevantes, como a percolação e a liquefação, bem como avaliar o efeito da incorporação de aditivos, tais como solos, cimento e argila, em graus de compactação inferiores, com o objetivo de ampliar ainda mais a segurança geotécnica das pilhas de rejeitos.

REFERÊNCIAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 7182: Solo: Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2020a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 16853: Solo — Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro. ABNT, 2020b.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 13029: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Brasil, 2024b.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 6458: Solos — Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2025b.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025c.

ALOK, Aman; BURMAN, Avijit; SAMUI, Pijush; KALOOP, Mosbeh R.; ELDESSOUKI, Mohamed. A Generalized Limit Equilibrium-Based Platform Incorporating Simplified Bishop, Janbu and Morgenstern–Price Methods for Soil Slope Stability Problems. **Advances In Civil Engineering**, [S.L.], v. 2024, n. 1, jan. 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/3053923>.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento De Rejeito Filtrado: A Expansão De Uma Alternativa Para Substituição De Barragens**. 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

AMOA, N. Large-Scale Tailings Filtration and Dry Stacking at Karara Magnetite Iron Ore Operation. **Proceedings Of Tailings And Mine Waste 2019**: University of British Columbia, Vancouver, p. 15-32, 17 nov. 2019. Disponível em: <https://tailingsandminewaste.com/conference-proceedings/>. Acesso em: 29 dez. 2025.

ARROYO, M.; GENS, A. Computational Analyses of Dam I Failure at the Corrego de Feijão Mine in Brumadinho. Final Report for VALE S.A., agosto, 2021.

ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). **ASTM D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Conshohocken, 2011.

BALBINO, J. B.. Caracterização geotécnica de um rejeito clay-like do Quadrilátero Ferrífero. 2022. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022.

BANSAH, K. J.; OWUSU, L.; ACQUAH, P. J.; BOAFO, A.; ABROKWAH, E.; NYAMEKYE, S. Y. The emerging phyllite mining industry in Ghana: economic potential and policy implications. **Resources Policy**, [S.L.], v. 107, p. 105642, ago. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105642>.

BELLIDO, N.; AGUILAR, Z. Seismic Vulnerability of a Tailings Dam Affected by Subduction Earthquakes. **International Journal Of Civil Infrastructure**, [S.L.], v. 07, 2024. Avestia Publishing. <http://dx.doi.org/10.11159/ijci.2024.002>.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União, Brasília, 2020a.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). **PNSB**, 2020b.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Estabelece critérios de segurança para barragens de mineração. Brasília: ANM, 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). **Resolução CNRH nº 242**, 29 de fevereiro de 2024.

CACCIUTTOLO, C.; ATENCIO, E. Dry Stacking of Filtered Tailings for Large-Scale Production Rates over 100,000 Metric Tons per Day: envisioning the sustainable future of mine tailings storage facilities. **Minerals**, [S.L.], v. 13, n. 11, p. 1445, 16 nov. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min13111445>.

CÂNDIDO, L. M.; SANTINI, A. W. H.; MOREIRAR, W. R.; TOTOUR, A. R.; RIBEIRO, F. S.; RODRIGUES, R. R. Processo De Filtragem Elimina Disposição De Rejeitos Em Barragem. **Abm Proceedings**, [S.L.], p. 431-441, out. 2019. Editora Blucher. <http://dx.doi.org/10.5151/2594-357x-33878>.

CÂNDIDO, V.; RICCIO, M.; MARTINS, C.. (2025). Determination of mechanical parameters for soil-sand-tailings-cement mixtures for numerical modeling purposes. *REM - International Engineering Journal*, 78(3), e240009. <https://doi.org/10.1590/0370-44672024780009>

CÂNDIDO, V. B. R. **Avaliação do comportamento mecânico de solo residual em misturas com rejeito de minério de ferro**. 2023. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Pec, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023.

CARDOZO, F. A. C. Comparação De Métodos Construtivos Para Barragens De Rejeito: Análise Dos Alteamentos À Montante E À Jusante. **Geotecnologias: Análises, Técnicas E Aplicações Em Pesquisa-Volume 2**. p. 44-59. Editora Científica Digital, 2024.

CARNEIRO, A. A. Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020, 146p. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/39772>.

CARNEIRO, J. J. V.; MARQUES, E. A. G.; FONSECA, A. J. P. V. da; FERRAZ, R. L.; OLIVEIRA, A. H. C. Characterization of an Iron Ore Tailing Sample and the Evaluation of Its Representativeness. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 41, n. 5, p. 2833-2852, 23 mar. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-023-02430-8>.

CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; TOBIAS JUNIOR, R.; CAMPOS, I. C.; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; CASTRO, K. J. S. X.; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N. U. A.; MIRANDA, M. P. S. Fundação tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of brazilian mining in global context. **Perspectives In Ecology And Conservation**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 145-151, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>.

CARVALHO, J. V. A.; WAGNER, A. C.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; GONÇALVES, T. M.; CONSOLI, N. C. Desafios na Descaracterização de Barragens: variabilidade de rejeitos. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Balneário Camboriú, 27 set. 2024. Editora Omnis Scientia. <http://dx.doi.org/10.47094/cobramseg2024/47>.

CARVALHO, L. R. **Avaliação da estabilidade de pilhas de rejeitados mineiros sob diferentes condições de fluxo em modelos numéricos**. 2022. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2022.

CONSOLI, N. C.; CARVALHO, J. V. A.; WAGNER A. C.; CARVALHO, I.; SILVA, J. P. S. Porosity and cement controlling the response of artificially cemented tailings–Portland cement blends under various confinements. *Scientific Reports*, v. 14, 80937, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80937-7>.

CONSOLI, N. C.; VOGT, Jordanna C.; SILVA, J. P. S.; CHAVES, H. M.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MOREIRA, E. B.; LOTERO, A. Behaviour of Compacted Filtered Iron Ore Tailings–Portland Cement Blends: new brazilian trend for tailings disposal by stacking. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 836, 14 jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app12020836>.

DAVIES, M. P.; MCROBERTS, E. C. Filtered tailings – past, present and future. In: *Proceedings of Tailings and Mine Waste Conference*. Vancouver: University of British Columbia, 2019.

DA SILVA, D. M. B.; DA SILVA, S. R.; RABBANI, E. R. K. Utilização De Sistemas De Aeronaves Não Tripuladas Na Gestão De Segurança De Barragens: uma revisão sistemática de literatura. **GEOFRONTER**, v. 11, p. e9219-e9219, 2025.

DAUCE, P. D.; CASTRO, G. B. de; LIMA, M. M. F.; LIMA, R. M. F. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. *Journal Of Materials Research And Technology*, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1052-1059, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.015>.

DEMOZ, A. Geotechnical Properties Determination of Thickened Fluid Fine Tailings. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 40, n. 4, p. 1887-1898, 22 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-021-01998-3>.

DIAS NETO, S. L. S.; FERRAZ, R. L.; SILVA, T. O.; MARQUES, E. A. G.; PITANGA, H. N.; CÂNDIDO, Eduardo Souza. Hydraulic Characteristics of Silt-Sized Iron Ore Tailings. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 42, n. 5, p. 3731-3753, 7 mar. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-024-02755-y>.

DU, C.; NIU, B.; WANG, L.; YI, F.; LIANG, L.. Experimental study of reasonable mesh size of geogrid reinforced tailings. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 0-0, 16 jun. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-13980-x>.

FINE SOFTWARE. **Secant Modulus of Soil Es**. Praga: Geo5, 2025. Disponível em: <https://www.geo5software.com/help/geo5/en/secant-modulus-of-soil-es-02/>. Acesso em: 02 mar. 2026.

GOMES, A. C. F.; MOURA, C. C.; SANTOS, R. A. Caracterização mineralógica e geotécnica de rejeito estocado em barragem de minério de ferro. In: **Congresso Brasileiro De Geotecnia Ambiental**, 9., 2019, São Carlos. *Anais...* São Carlos: ABMS, 2019. p. 33–39.

HE, K.; SUN, Y.; ZHAO, M.; CHEN, X.; JIAO, A.; SUN, L.; WU, J.; LI, J. Experimental Study on the Effect of the Displacement Rate on the Shear Strength of Coastal Soft Soil. **Buildings**, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 3491, 31 out. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings14113491>.

HUANG, X.; HORN, R.; REN, T. Soil structure effects on deformation, pore water pressure, and consequences for air permeability during compaction and subsequent shearing. **Geoderma**, [S.L.], v. 406, p. 115452, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115452>.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório Anual De Atividades 2024**. Brasil, 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/03/IBRAM_Relatorio-Anual-2024_completo_web.pdf. Acesso em: 07 dez. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Critical Minerals Market Review 2023*. Paris, 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c7716240-ab4f-4f5d-b138-291e76c6a7c7/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf>. Acesso em 18 set. 2025.

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. Global Industry Standard on Tailings Management. Londres: ICMM, 2021. Disponível em: <https://www.icmm.com/tailings-management>

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. Global Industry Standard on Tailings Management: implementation progress and updates. Londres: ICMM, 2023. Disponível em: <https://www.icmm.com/tailings-management>

ILLÉS, Z.; KÁDÁR, I.; NAGY, G.; MAHLER, A.; NAGY, L. Estimation of constrained modulus from CPT measurements in case of Holocene sands. **Cone Penetration Testing 2022**, [S.L.], p. 466-472, 23 jun. 2022. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003308829-65>.

JALALICHI, Z.; OVALLE, C.; OUELLET, S. Back-analysis of the geotechnical stability of high waste rock piles. **Proceedings Of Tailings And Mine Waste 2019**: University of British Columbia, Vancouver, p. 1595-1610, 02 nov. 2025. Disponível em: <https://tailingsandminewaste.com/conference-proceedings/>. Acesso em: 29 dez. 2025.

LE, H.; PABST, T. Influence of Rainfall on the Stability of Filtered Tailings Slope with Waste Rock Inclusions. **Lecture Notes In Civil Engineering**, p. 2453-2464. Springer Nature Singapore, 2024. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-99-9722-0_170.

LEDESMA, O.; MANZANAL, D.; SFRISO, A. Formulation and numerical implementation of a state parameter-based generalized plasticity model for mine tailings. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 135, p. 104158, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104158>.

LEROY, M. L.; KENMOE, O. R. M.; NKUISSI, H. J. T.; KOUAYEP, S. L.; CHEBOU, G. N.; CHAMGOUÉ, A. C.; MOHAMADOU, I. Comparative Analysis of the Slope Stability Using Slide and Plaxis 2D Software: a case study of tombel pozzolan quarry (south-west cameroon). **Applied And Environmental Soil Science**, [S.L.], v. 2024, p. 1-20, 21 maio 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/8260177>.

LI, D; CUI, X.; HUANG, J; HAN, Y. An Experimental on Filtration and Clogging of Geotextile Filters around Drain Pipes in Fine Tailings. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 1767-1776, maio 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-024-1292-0>.

MACEDO, J.; VERGARAY, L. Properties of mine tailings for static liquefaction assessment. **Canadian Geotechnical Journal**, [S.L.], v. 59, n. 5, p. 667-687, julho, 2021. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2020-0600>.

MACHADO, L. S. **Estabilização De Rejeitos De Minério De Ferro Filtrados Com Uso De Aditivos Para Disposição Em Pilhas Compactadas (Dry Stacking)**. 2022. 290 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

MARTINATTO, C. S.; MEDINA, G. S.; FARENZENA, H. P.; ROCHA, M. M. S.; CONSOLI, N. C. Caracterização física, química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Balneário Camboriú, 27 set. 2024. Editora Omnis Scientia. <http://dx.doi.org/10.47094/cobramseg2024/453>.

MEYER, Z.; OLSZEWSKA, M. Methods Development for the Constrained Elastic Modulus Investigation of Organic Material in Natural Soil Conditions. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 22, p. 6842, 12 nov. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14226842>.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K.; O'SULLIVAN, C. **Fundamentals of Soil Behavior**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2025. 688 p. ISBN: 978-1-119-83232-4.

MMBANDO, P. Effect of compressibility on the stress state of wet and dry filtered tailings stacks. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 61, n. 6, p. 999–1014, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0090>.

OLDECOP, L.; RODARI, G. Unsaturated mine tailings disposal. **Soils And Rocks**, [S.L.], v. 44, n. 3, p. 1-12, 13 ago. 2021. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2021.067421>.

PEREIRA, L. M. M. **Estudo de propriedades geotécnicas de um rejeito de minério de ferro filtrado compactado para empilhamento a seco**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2024.

PRIMO, P. P. B.; ANTUNES, M. N.; ARIAS, A. R. L.; OLIVEIRA, A. E.; SIQUEIRA, C. E. Mining Dam Failures in Brazil: comparing legal post-disaster decisions. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.L.], v. 18, n. 21, p. 11346, 28 out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph182111346>.

RESENDE, F. D. S.; RIBEIRO, F. M.; DORNELAS, I. P. QUATRO ANOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM EM BRUMADINHO. **Leopoldianum**, [S.L.], v. 49, n. 138, p. 18, 1 set. 2023. Universidade Católica de Santos. <http://dx.doi.org/10.58422/releo2023.e1396>.

ROCHA, L. C. As tragédias de Mariana e Brumadinho. **Caderno de geografia**, v. 31, n. 1, p. 184-184, 2021.

RODRÍGUEZ, R.; MUÑOZ-MORENO, A.; CAPARRÓS, A. V.; GARCÍA-GARCÍA, C.; BRIME-BARRIOS, Á.; ARRANZ-GONZÁLEZ, J. C.; RODRÍGUEZ-GÓMEZ, V.; FERNÁNDEZ-NARANJO, F. J.; ALCOLEA, A. How to Prevent Flow Failures in Tailings Dams. **Mine Water And The Environment**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 83-112, 17 fev. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-021-00752-8>.

RÓGENES, E.; PAES, I. T.; DELGADO, B. G.; BITTAR, R. J.; GOMES, A. S.; CIRONE, A.; FÁVERO NETO, A. H.; RASMUSSEN, L. L. Assessing Static Liquefaction Triggers in Tailings Dams Using the Critical State Constitutive Models CASM and NorSand. **International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics**, [S.L.], v. 49, n. 4, p. 1092-1112, 13 dez. 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.3914>.

SEPÚLVEDA, R. G.; ROBERT, E. S.; CAMACHO-TAUTA, J. Assessment of the Self-Compaction Effect in Filtered Tailings Disposal under Unsaturated Condition. **Minerals**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 422, 30 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min12040422>.

SILVA, J. P. S.; CARVALHO, J. V. A.; WAGNER, A. C.; CACCIARI, P. P.; CONSOLI, N. C. On the mechanics of filtered compacted consolidated and overconsolidated iron ore tailings at high pressures. **Canadian Geotechnical Journal**, [S.L.], v. 61, n. 3, p. 575-581, 1 mar. 2024. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2023-0056>.

SILVA, P. H. A. da. **Simulação Numérica Das Poropressões Em Aterros Construídos Com Resíduo Da Produção De Alumina Desaguado Por Filtros Prensa**. 2020. 193 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

TARIQ, M.; PEKKARI, A.; GUSTAFSON, A.; SCHUNNESSON, H.; JOHANSSON, J.. End-Users' Perspectives on Digitalisation and Automation—Insights from the Swedish Mining Industry. **Mining, Metallurgy & Exploration**, [S.L.], v. 42, n. 2, p. 571-582, 4 mar. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42461-025-01203-6>.

VENTURIN, A. M. **Análise De Percolação De Uma Pilha De Rejeito Filtrado**. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

VERGILIO, C. S.; LACERDA, D.; OLIVEIRA, B. C. V. de; SARTORI, E.; CAMPOS, G. M.; PEREIRA, A. L. S.; AGUIAR, D. B. de; SOUZA, T. S.; ALMEIDA, M. G. de; THOMPSON, F. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Scientific Reports**, [S.L.], v. 10, n. 1, 3 abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-62700-w>.

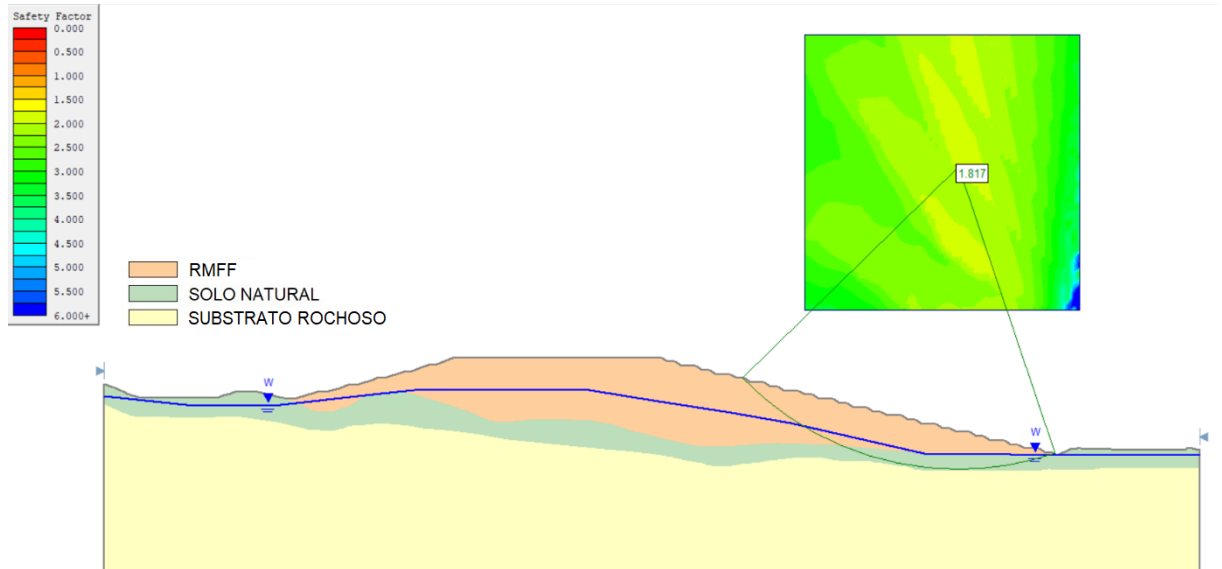
VILLENEUVE, M. C.; HEAP, M. J. Calculating the cohesion and internal friction angle of volcanic rocks and rock masses. **Volcanica**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 279-293, 23 nov. 2021. Volcanica. <http://dx.doi.org/10.30909/vol.04.02.279293>.

WANG, W.; CAO, G.; LI, Y.; ZHOU, Y.; LU, T.; WANG, Y.; ZHENG, B.. Experimental Study of Dynamic Characteristics of Tailings With Different Reconsolidation Degrees After Liquefaction. **Frontiers In Earth Science**, [S.L.], v. 10, 11 abr. 2022. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/feart.2022.876401>.

WINSA, Minna; PETROVIC, Nikifor; MOHAMMADI, Arezoo. Assessment of the tailings settlement and influence on cap design. **Proceedings Of The International Conference On Mine Closure**, [S.L.], p. 1-11, 2025. Australian Centre for Geomechanics, Perth. http://dx.doi.org/10.36487/acg_repo/2515_72.

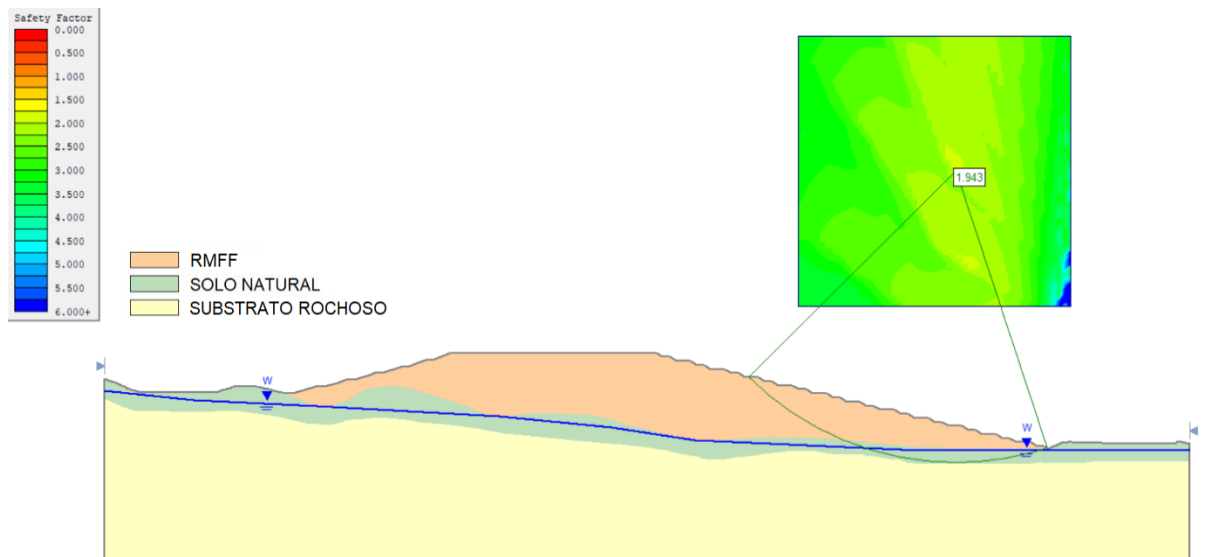
ANEXO A – ANÁLISES SLIDE2

Figura 32: FS para GC=99%, I= 32° e NA crítico



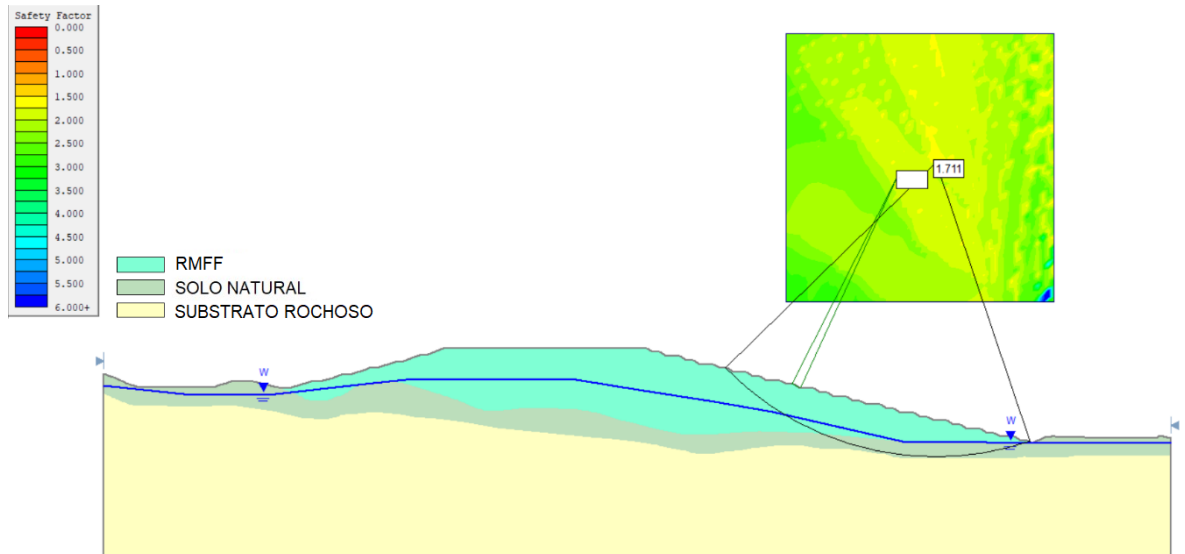
Fonte: Autor (2026)

Figura 33: FS para GC=99%, I= 32° e NA normal



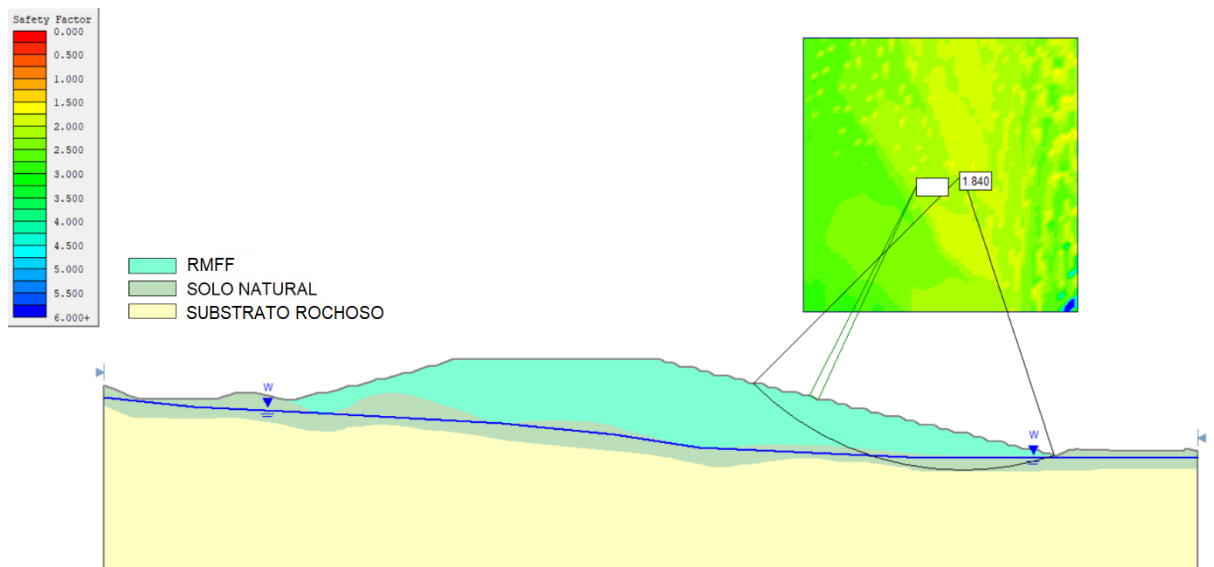
Fonte: Autor (2026)

Figura 34: FS para GC=93%, I= 32° e NA crítico



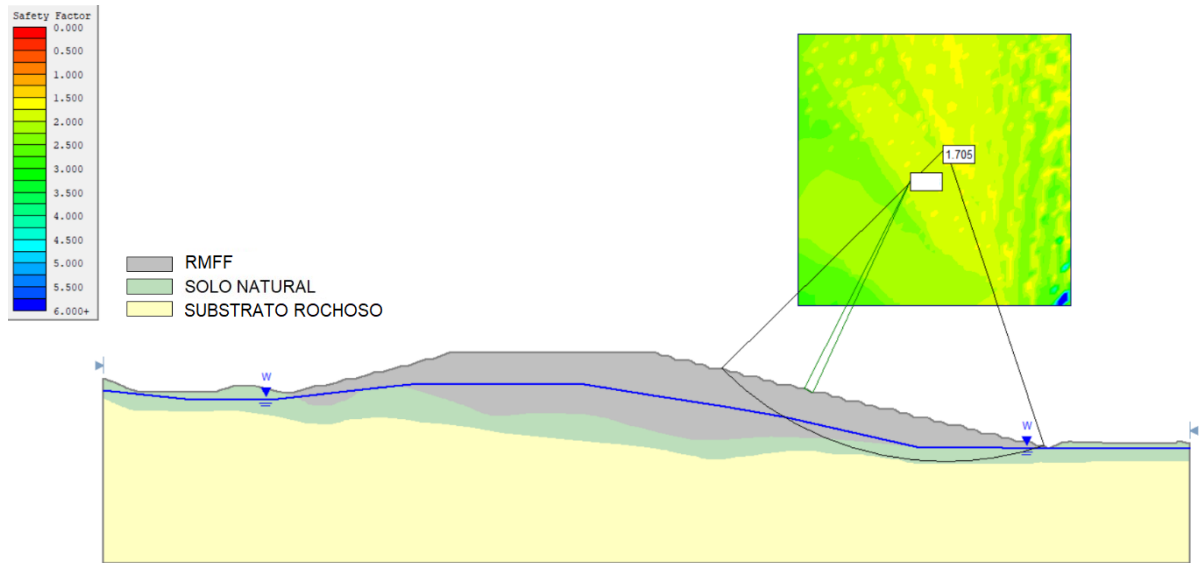
Fonte: Autor (2026)

Figura 35: FS para GC=93%, I= 32° e NA normal



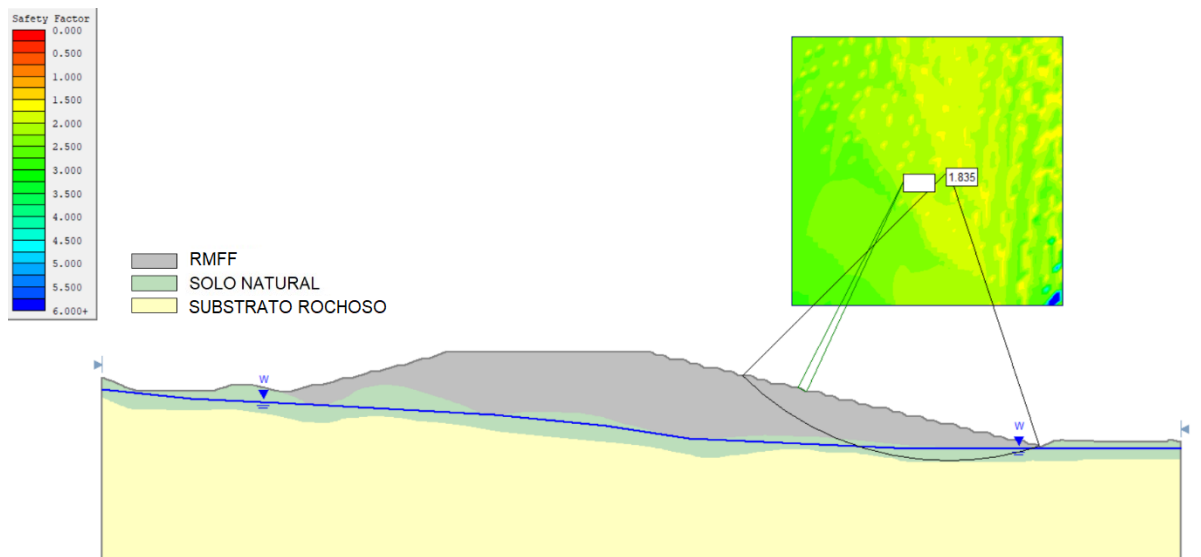
Fonte: Autor (2026)

Figura 36: FS para GC=88%, I= 32° e NA crítico



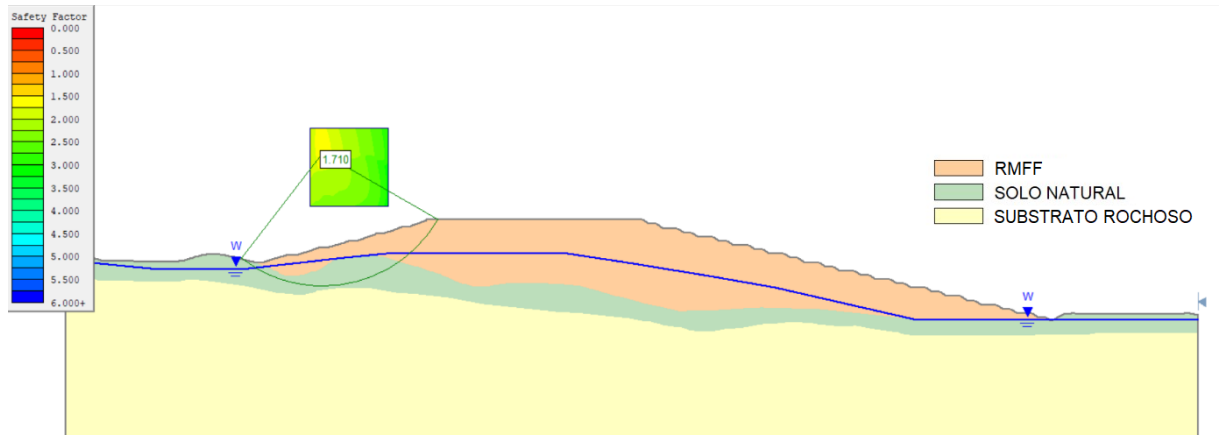
Fonte: Autor (2026)

Figura 37: FS para GC=88%, I= 32° e NA normal



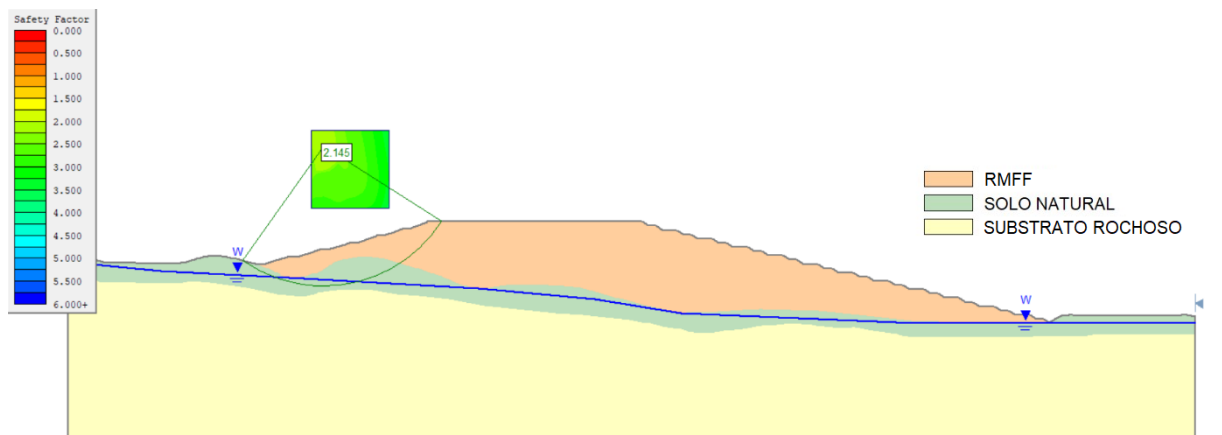
Fonte: Autor (2026)

Figura 38: FS para GC=99%, I= 32°, NA crítico e Análise Direita-Esquerda



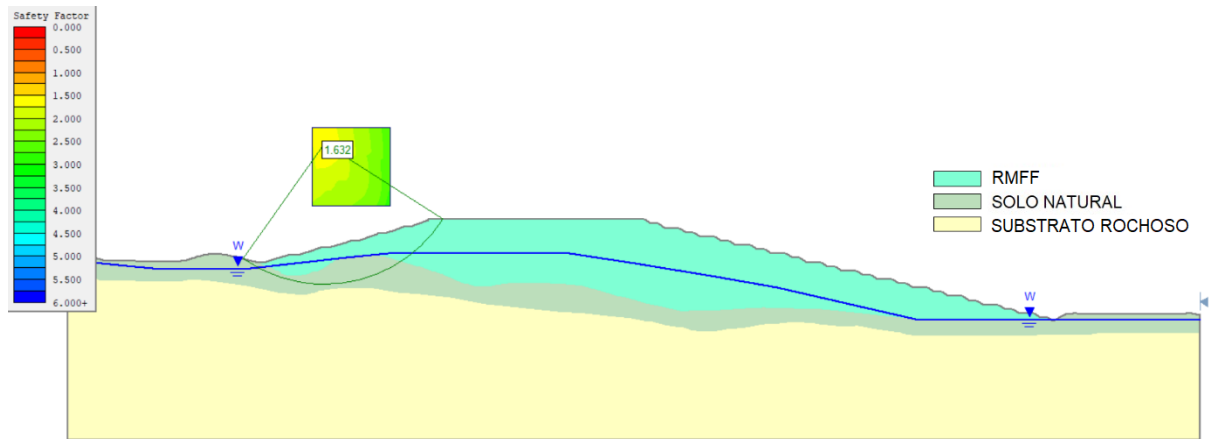
Fonte: Autor (2026)

Figura 39: FS para GC=99%, I= 32°, NA normal e Análise Direita-Esquerda



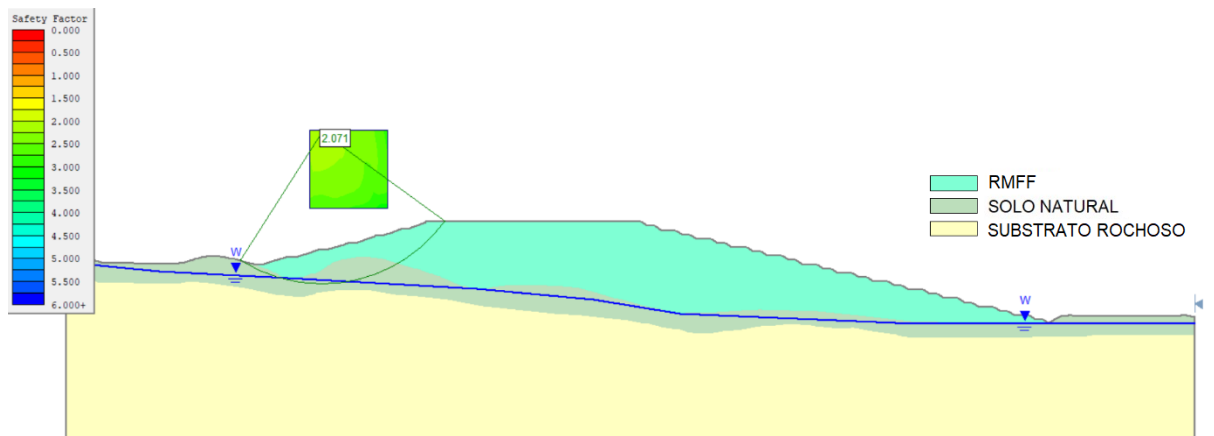
Fonte: Autor (2026)

Figura 40: FS para GC=93%, I= 32°, NA crítico e Análise Direita-Esquerda



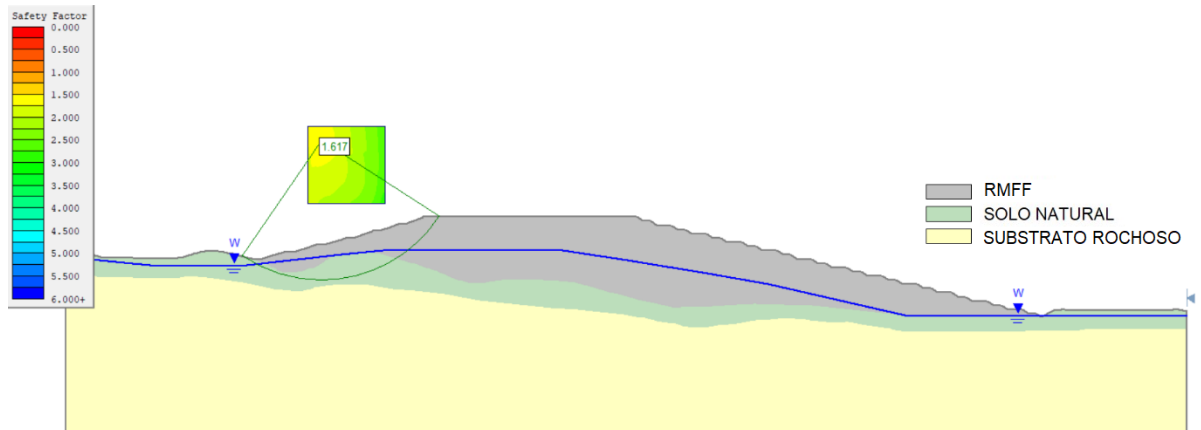
Fonte: Autor (2026)

Figura 41: FS para GC=93%, I= 32°, NA normal e Análise Direita-Esquerda



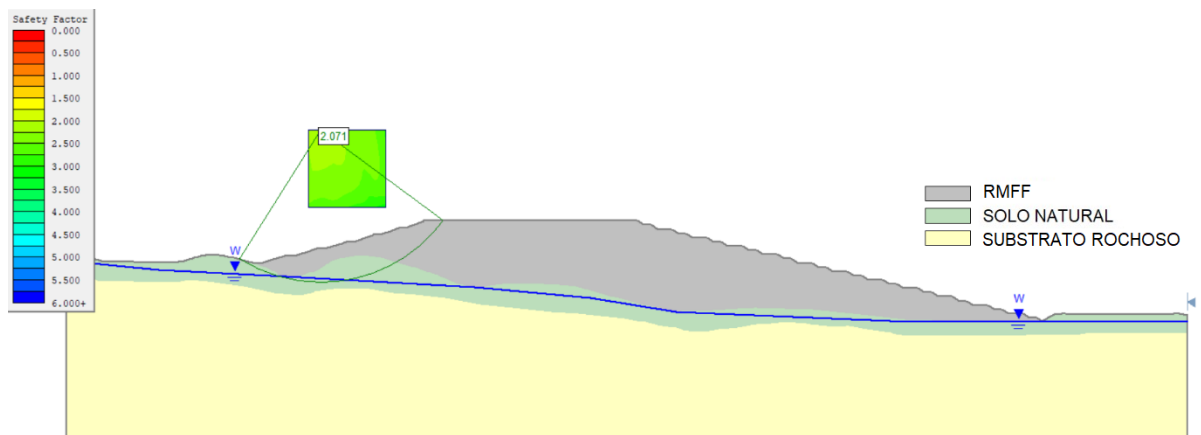
Fonte: Autor (2026)

Figura 42: FS para GC=88%, I= 32°, NA crítico e Análise Direita-Esquerda



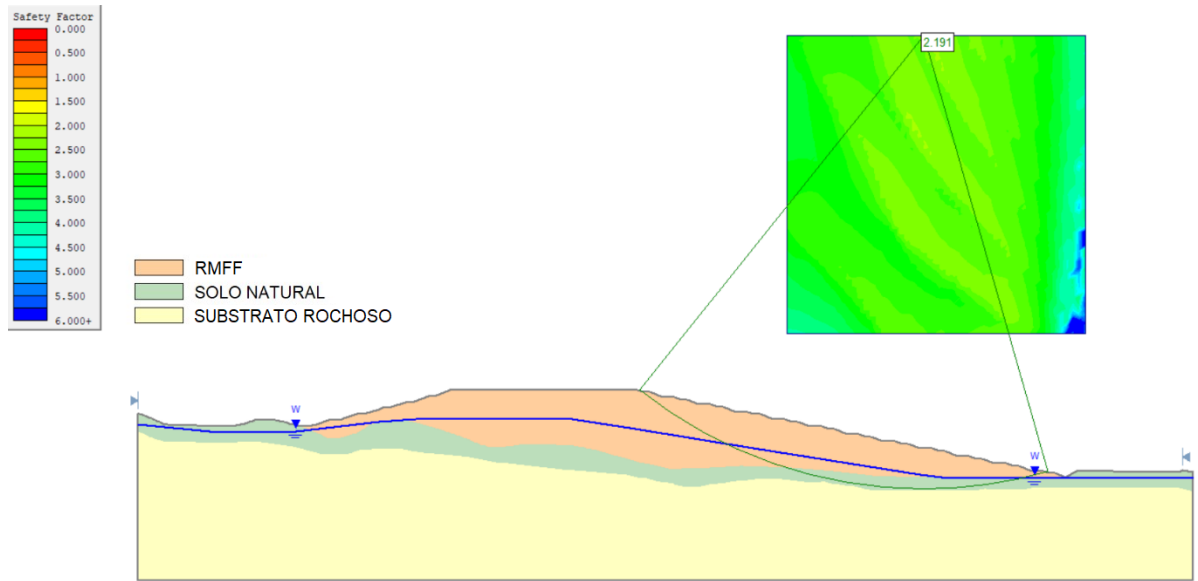
Fonte: Autor (2026)

Figura 43: FS para GC=88%, I= 32°, NA normal e Análise Direita-Esquerda



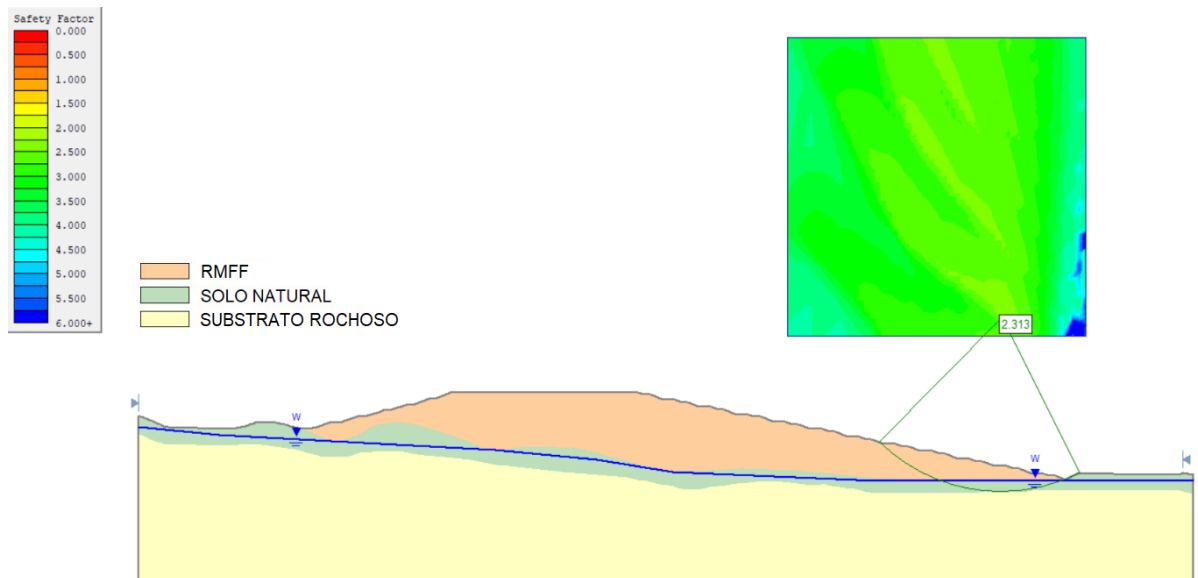
Fonte: Autor (2026)

Figura 44: FS para GC=99%, I= 25° e NA crítico



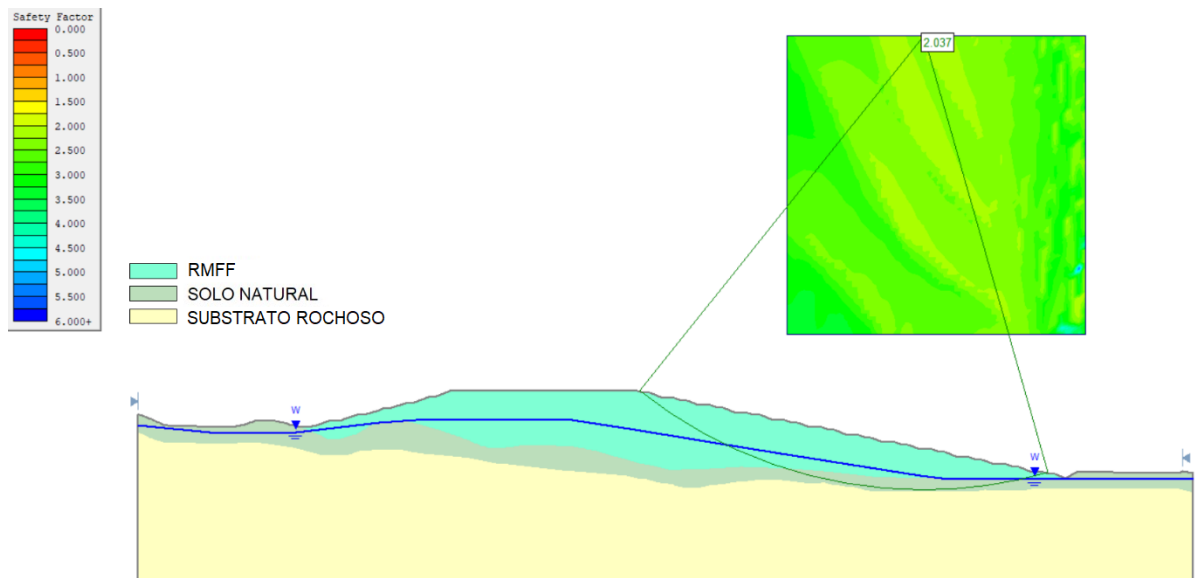
Fonte: Autor (2026)

Figura 45: FS para GC=99%, I= 25° e NA normal



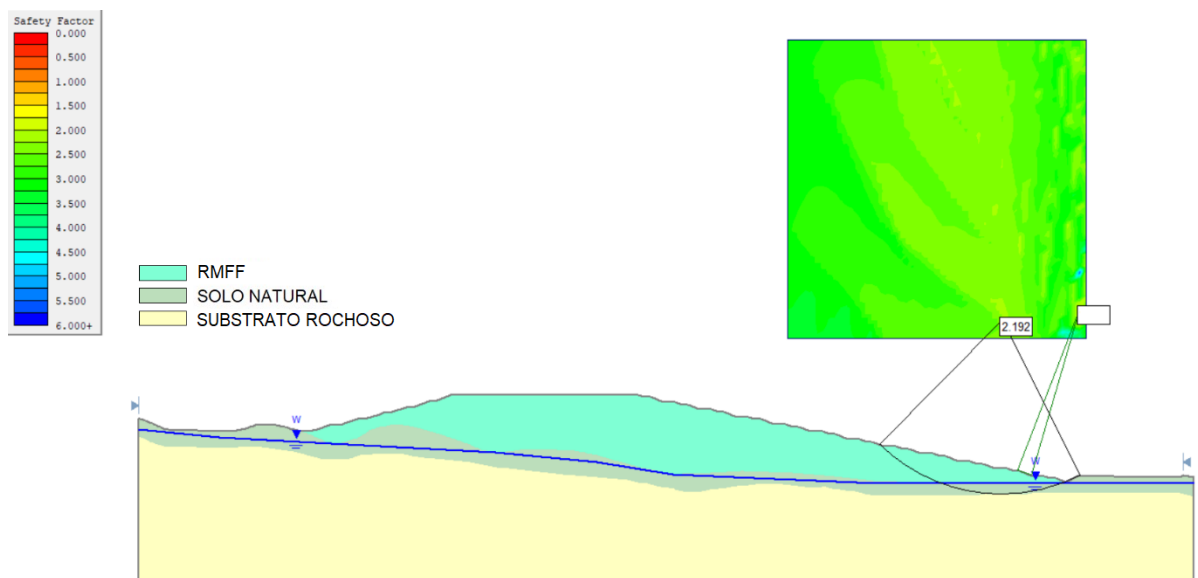
Fonte: Autor (2026)

Figura 46: FS para GC=93%, I= 25° e NA crítico



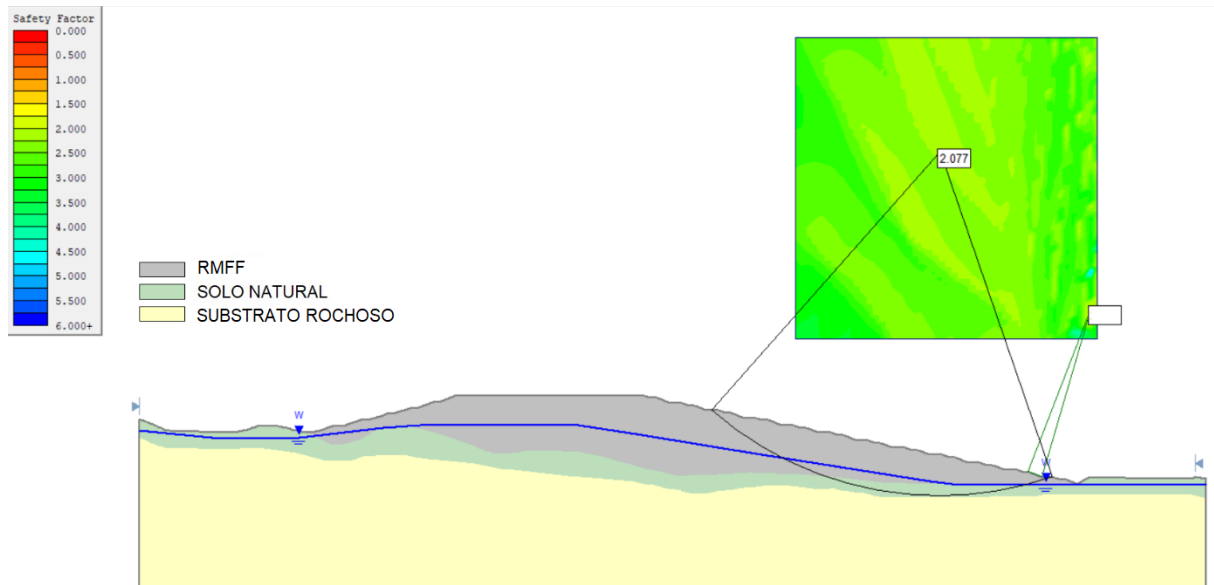
Fonte: Autor (2026)

Figura 47: FS para GC=93%, I= 25° e NA normal



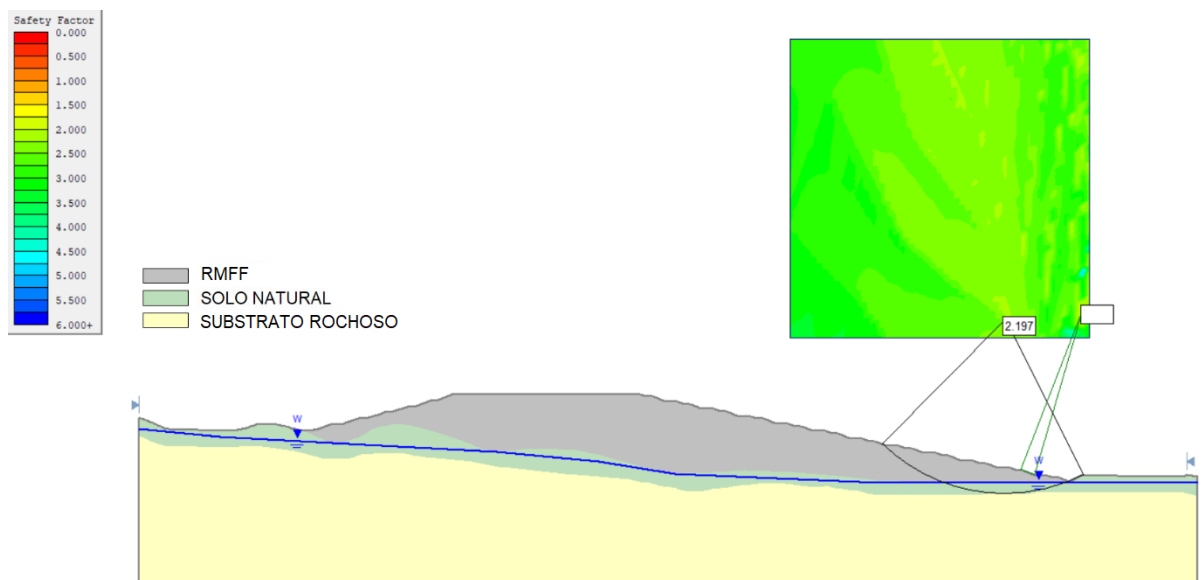
Fonte: Autor (2026)

Figura 48: FS para GC=88%, I= 25° e NA crítico



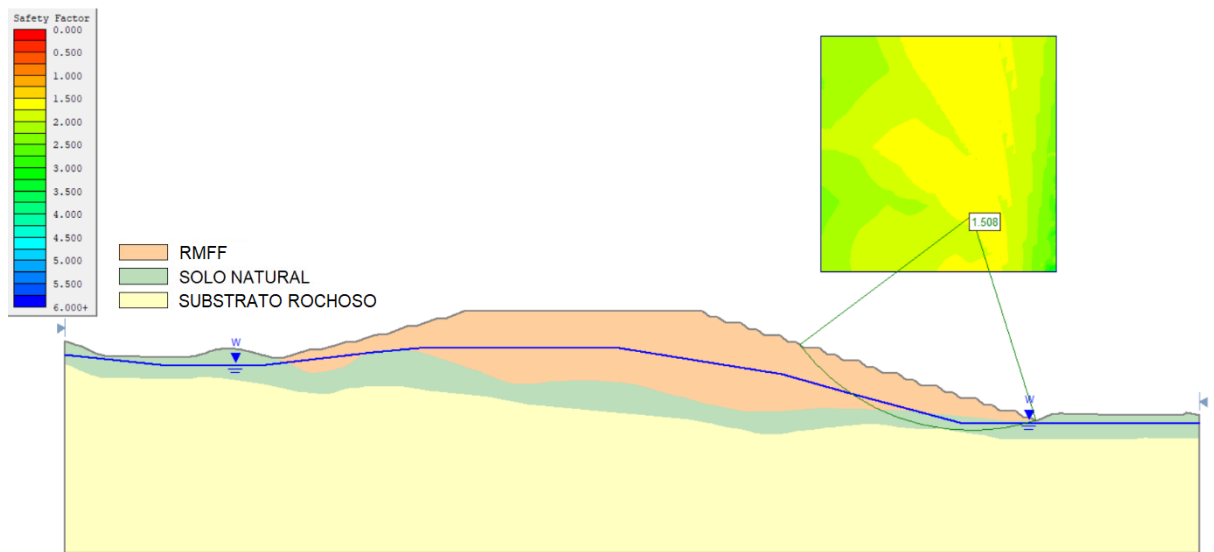
Fonte: Autor (2026)

Figura 49: FS para GC=88%, I= 25° e NA normal



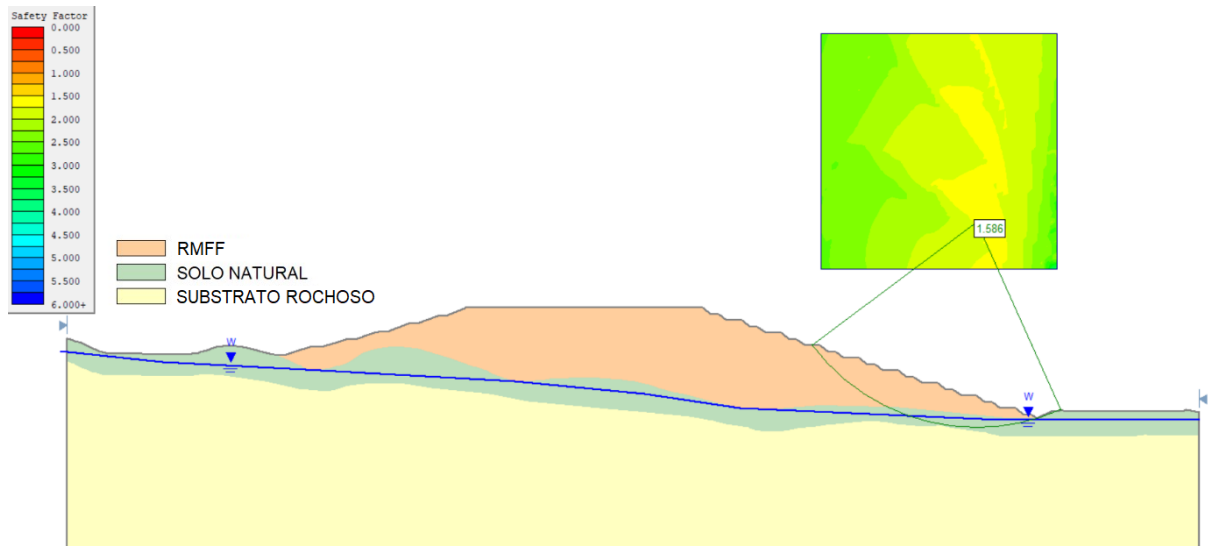
Fonte: Autor (2026)

Figura 50: FS para GC=99%, I= 39° e NA crítico



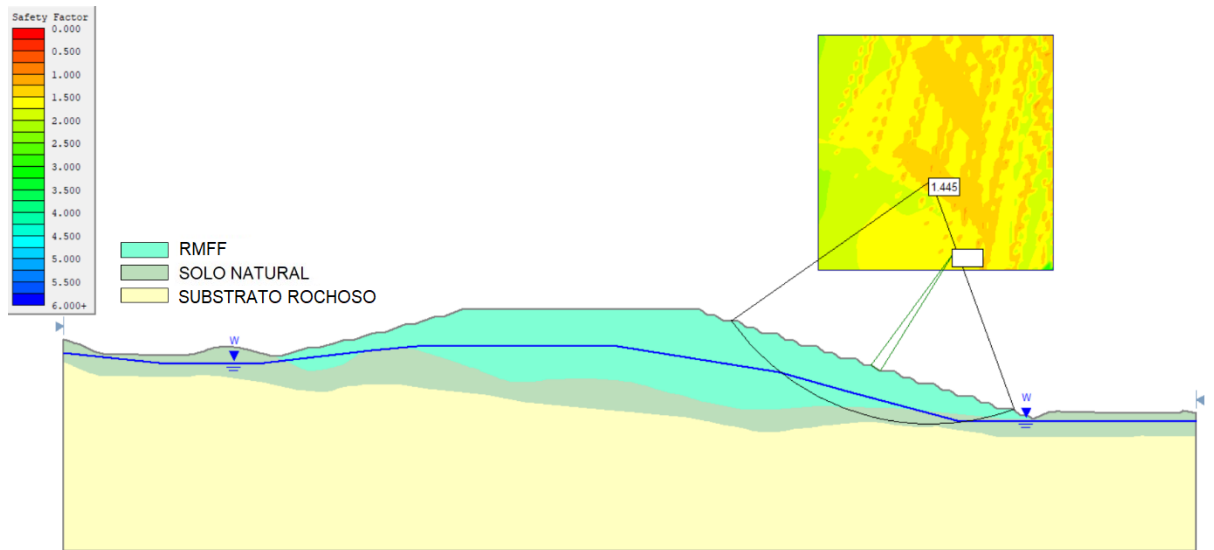
Fonte: Autor (2026)

Figura 51: FS para GC=99%, I= 39° e NA normal



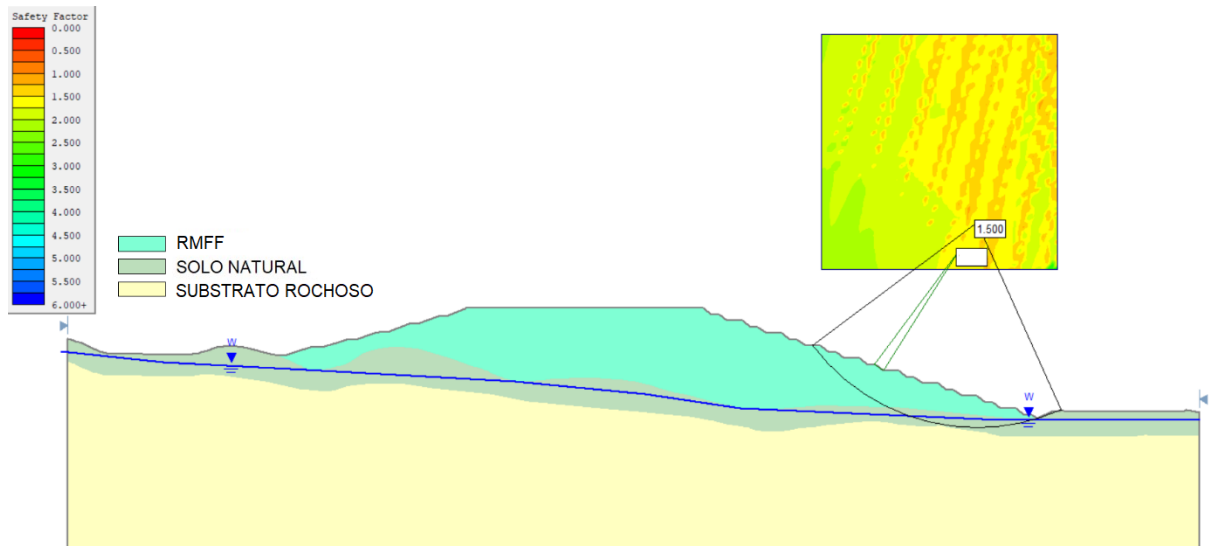
Fonte: Autor (2026)

Figura 52: FS para GC=93%, I= 39° e NA crítico



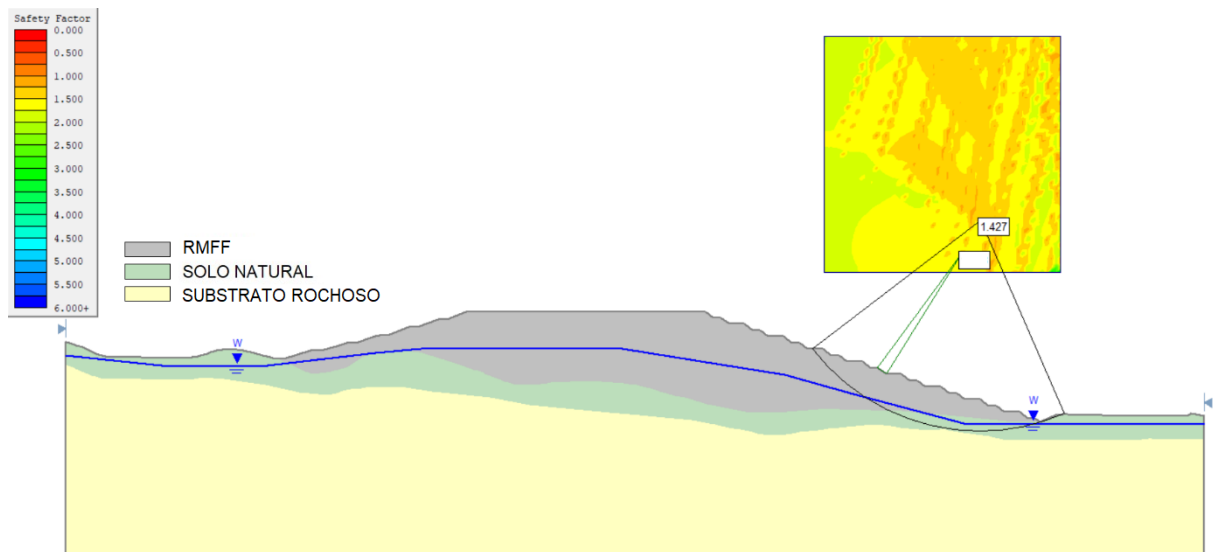
Fonte: Autor (2026)

Figura 53: FS para GC=93%, I= 39° e NA normal



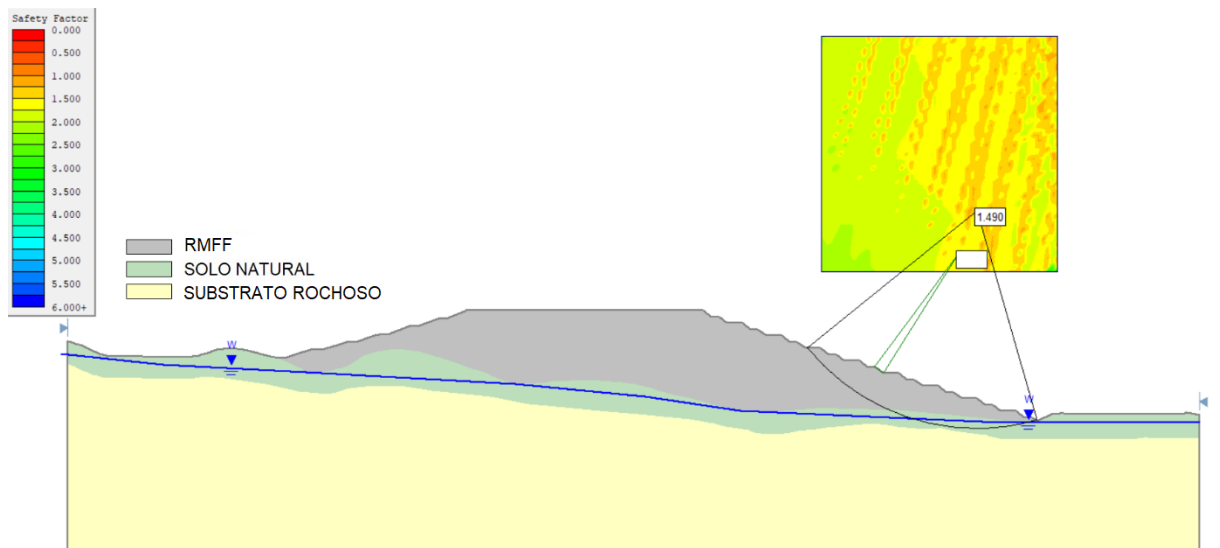
Fonte: Autor (2026)

Figura 54: FS para GC=88%, I= 39° e NA crítico



Fonte: Autor (2026)

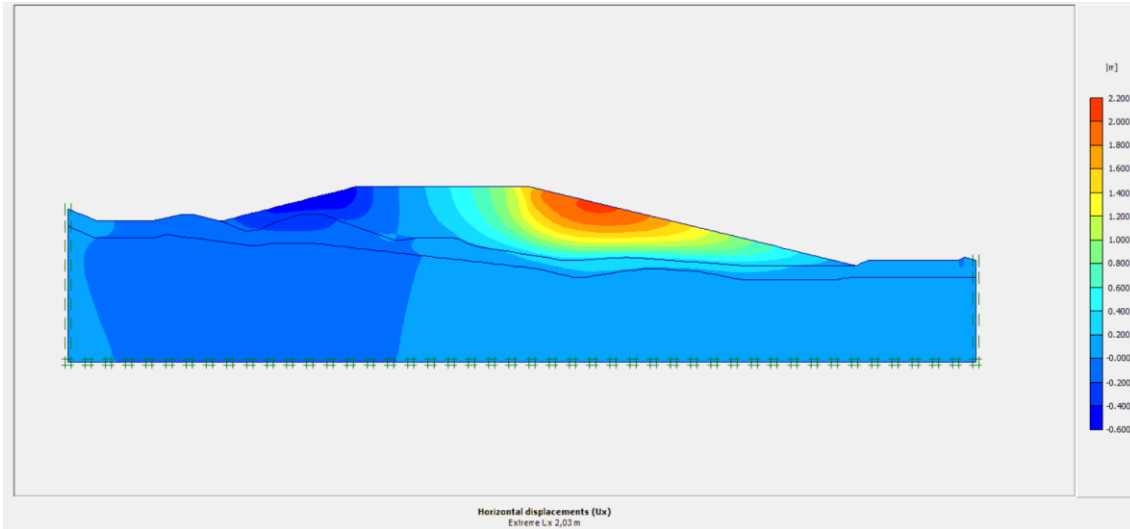
Figura 55: FS para GC=88%, I= 39° e NA normal



Fonte: Autor (2026)

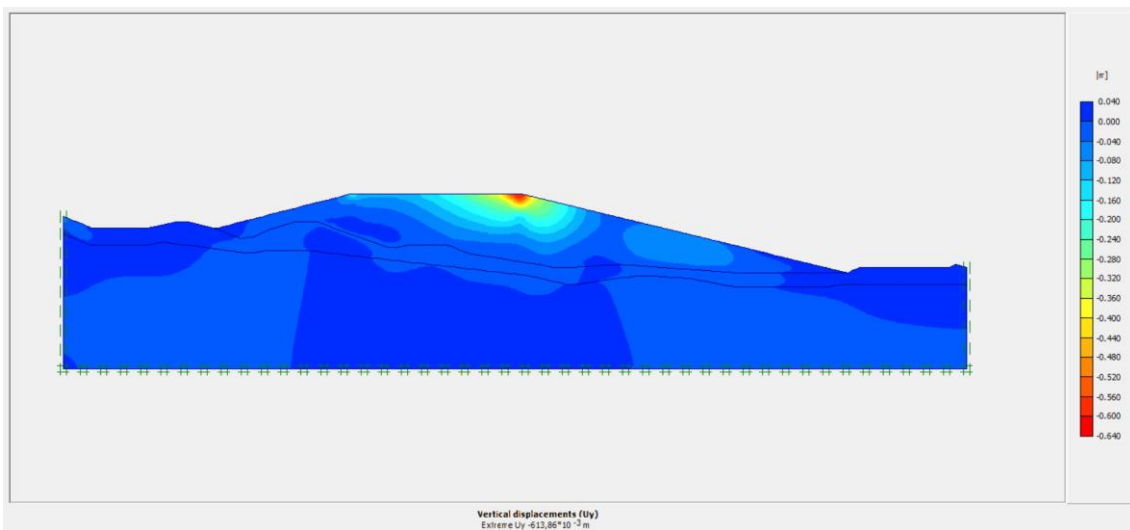
ANEXO B – ANÁLISES PLAXIS 2D

Figura 56: Deslocamentos horizontais para GC=99% e NA normal



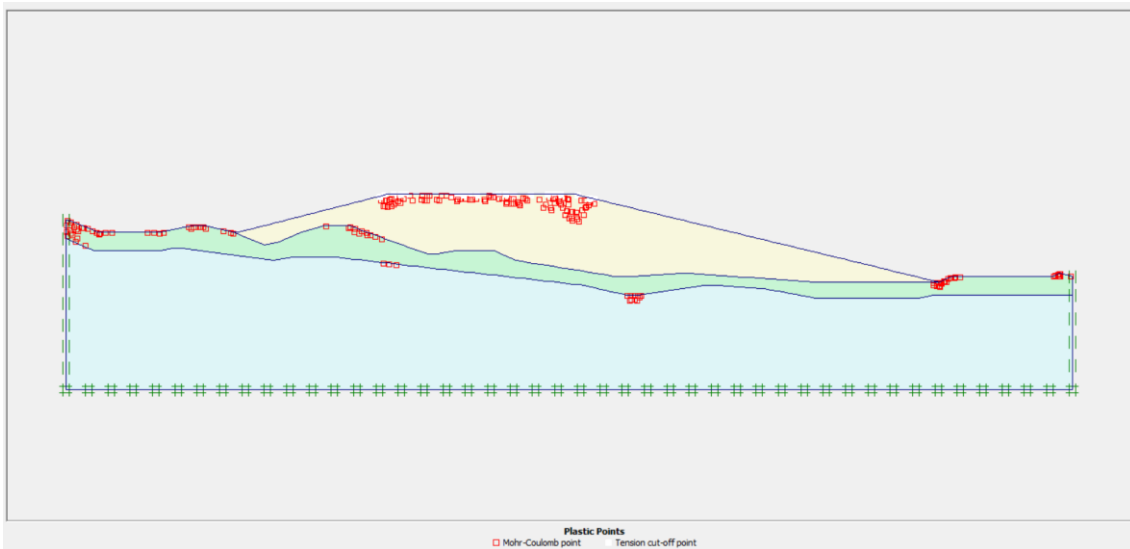
Fonte: Autor (2026)

Figura 57: Deslocamentos verticais para GC=99% e NA normal



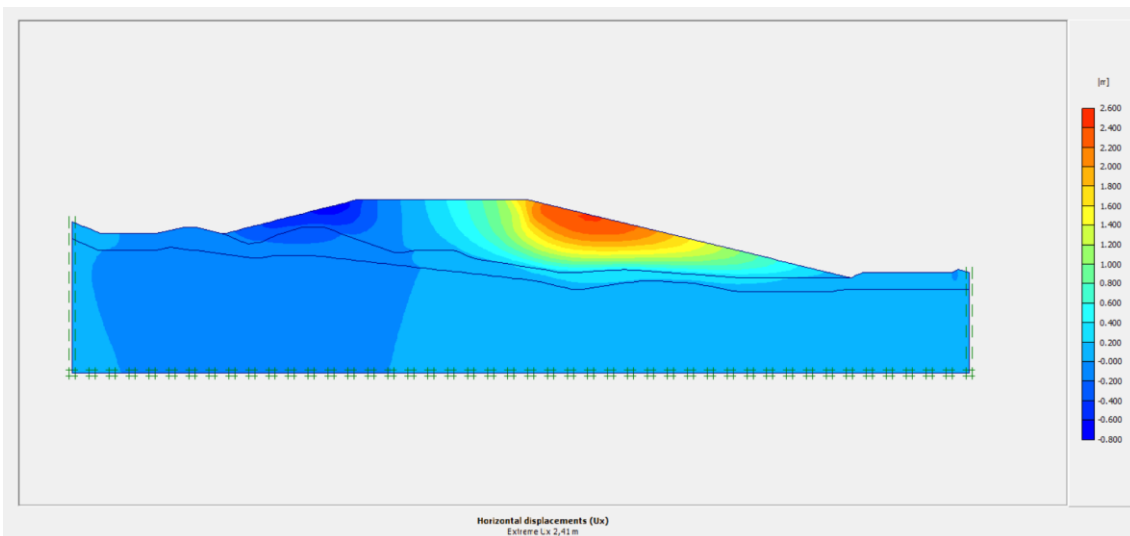
Fonte: Autor (2026)

Figura 58: Pontos de plastificação para GC=99% e NA normal



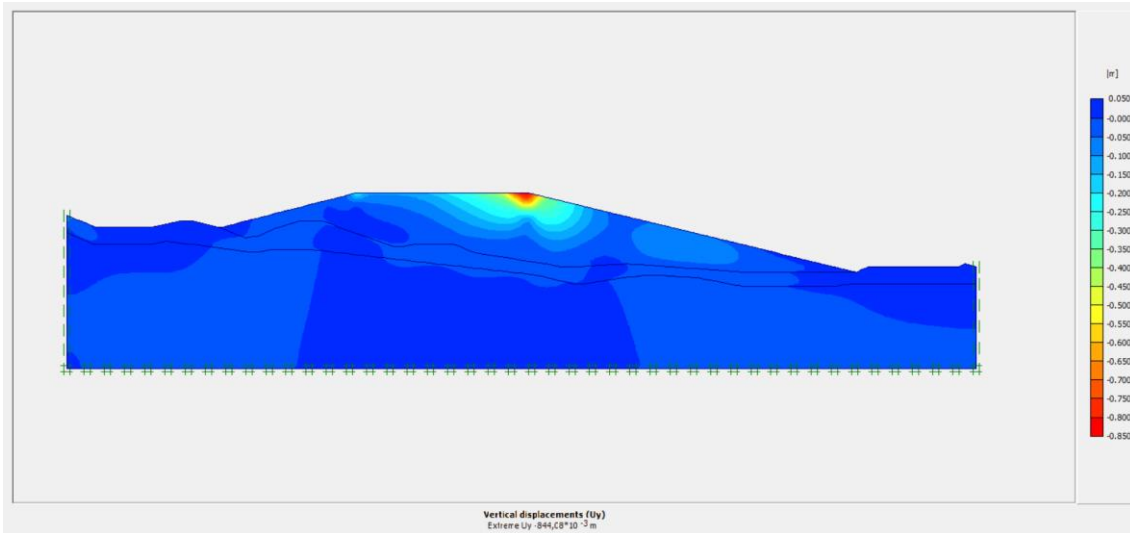
Fonte: Autor (2026)

Figura 59: Deslocamentos horizontais para GC=93% e NA normal



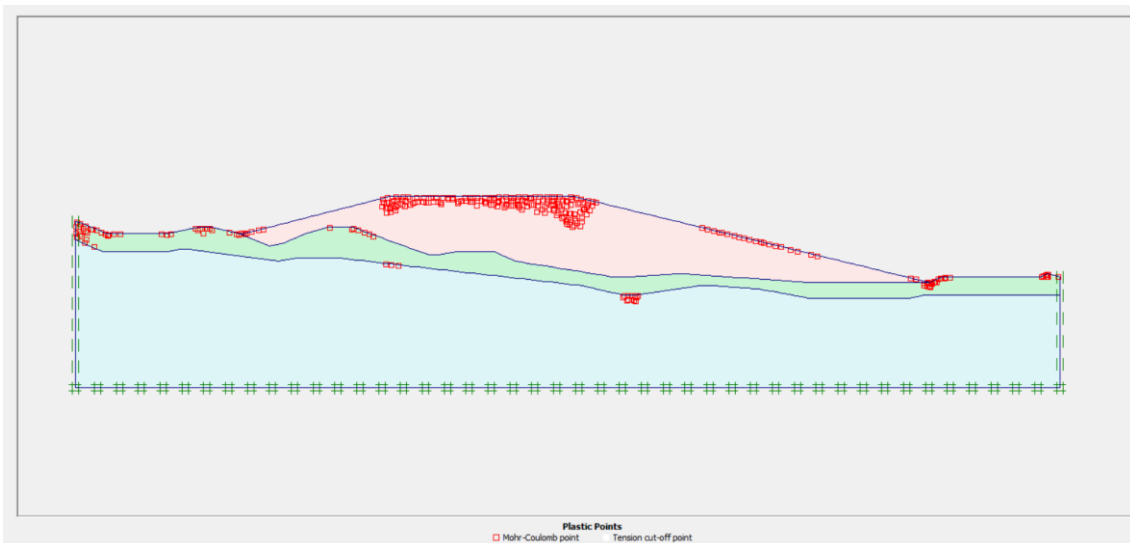
Fonte: Autor (2026)

Figura 60: Deslocamentos verticais para GC=93% e NA normal



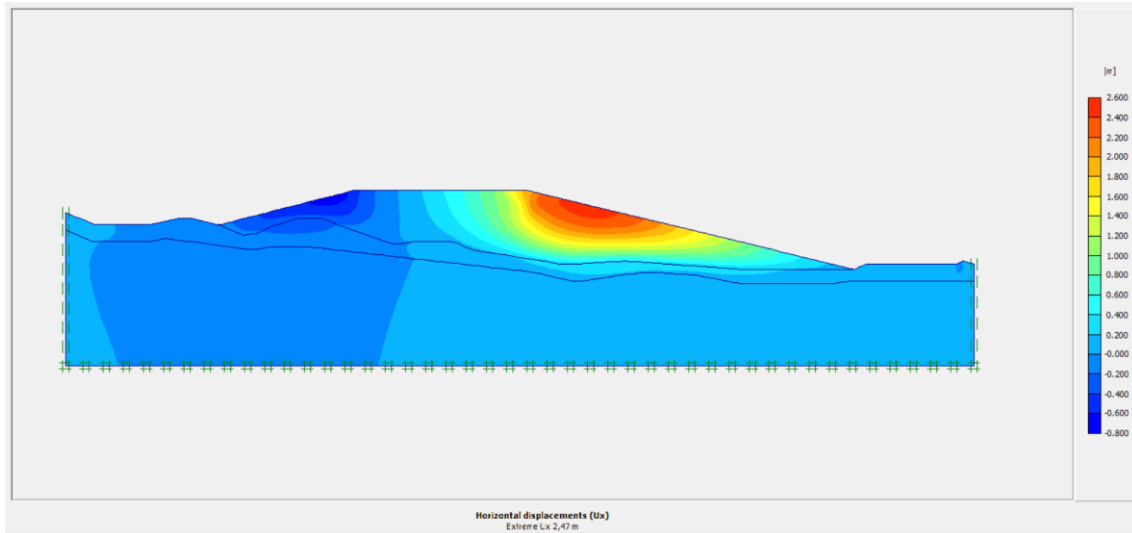
Fonte: Autor (2026)

Figura 61: Pontos de plastificação para GC=93% e NA normal



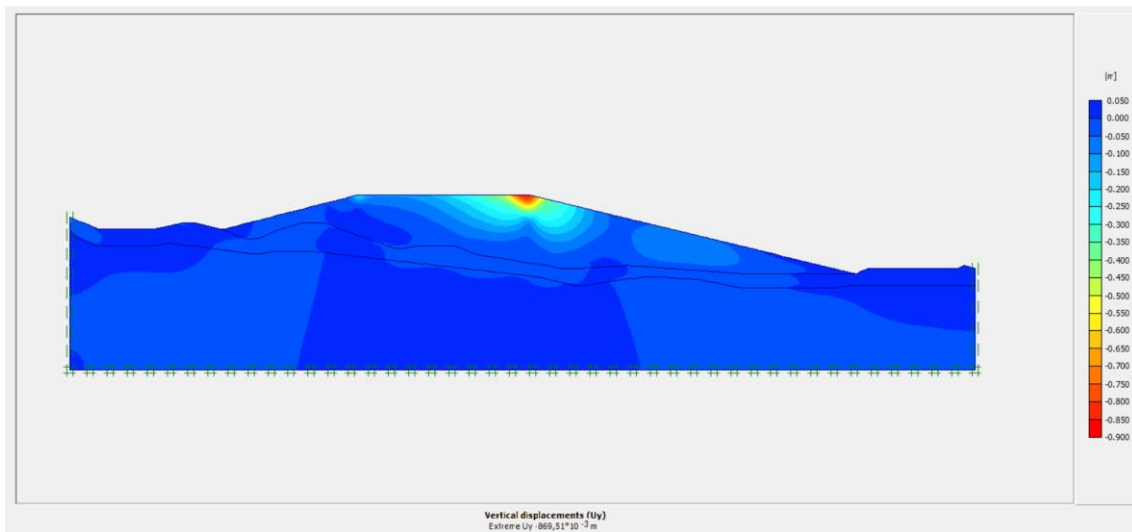
Fonte: Autor (2026)

Figura 62: Deslocamentos horizontais para GC=88% e NA normal



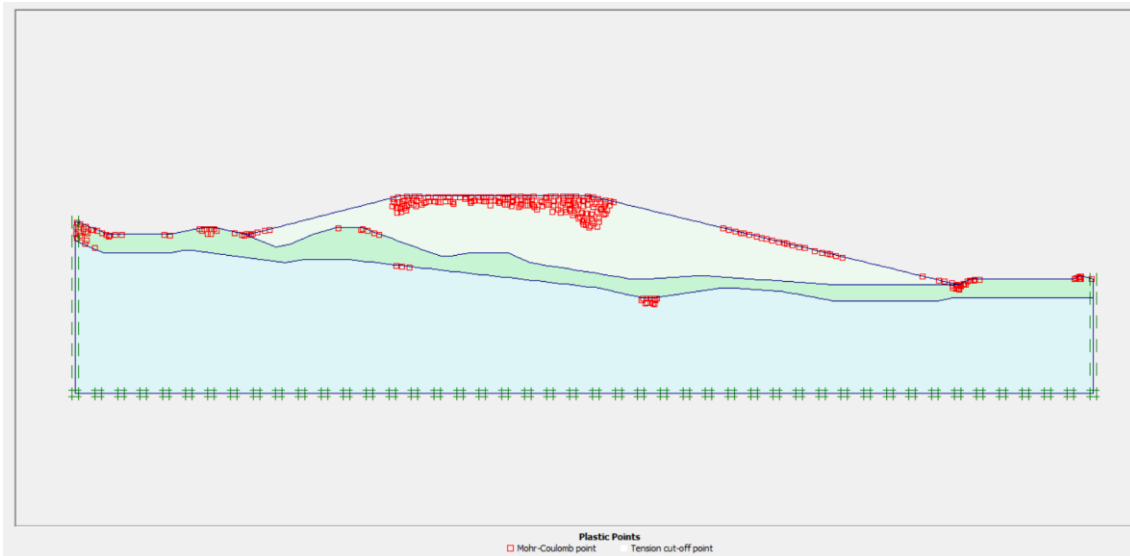
Fonte: Autor (2026)

Figura 63: Deslocamentos verticais para GC=88% e NA normal



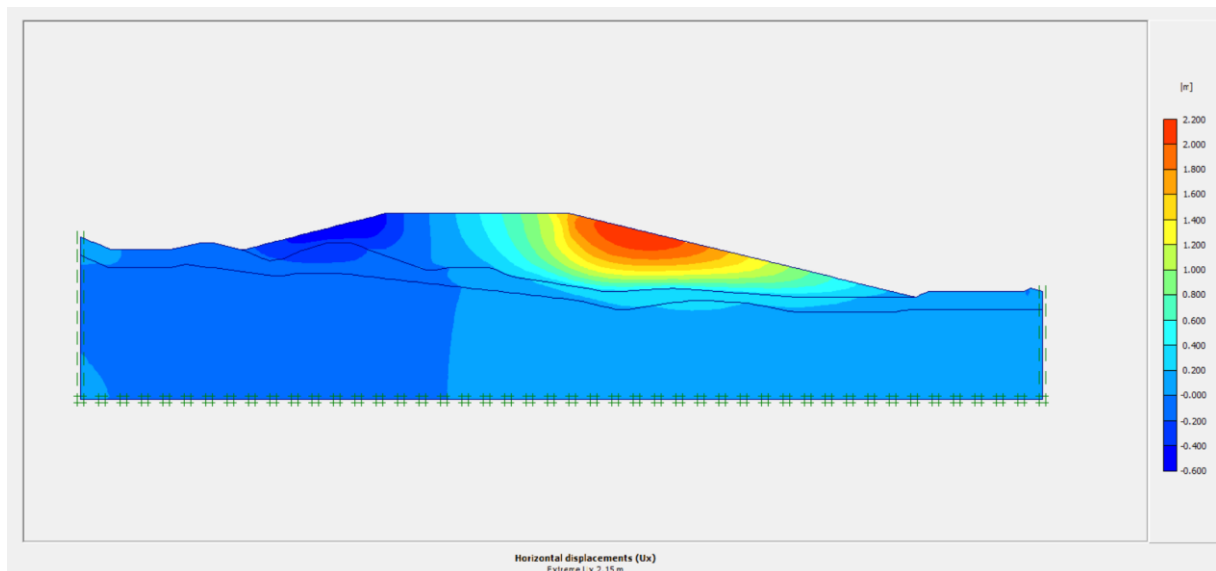
Fonte: Autor (2026)

Figura 64: Pontos de plastificação para GC=88% e NA normal



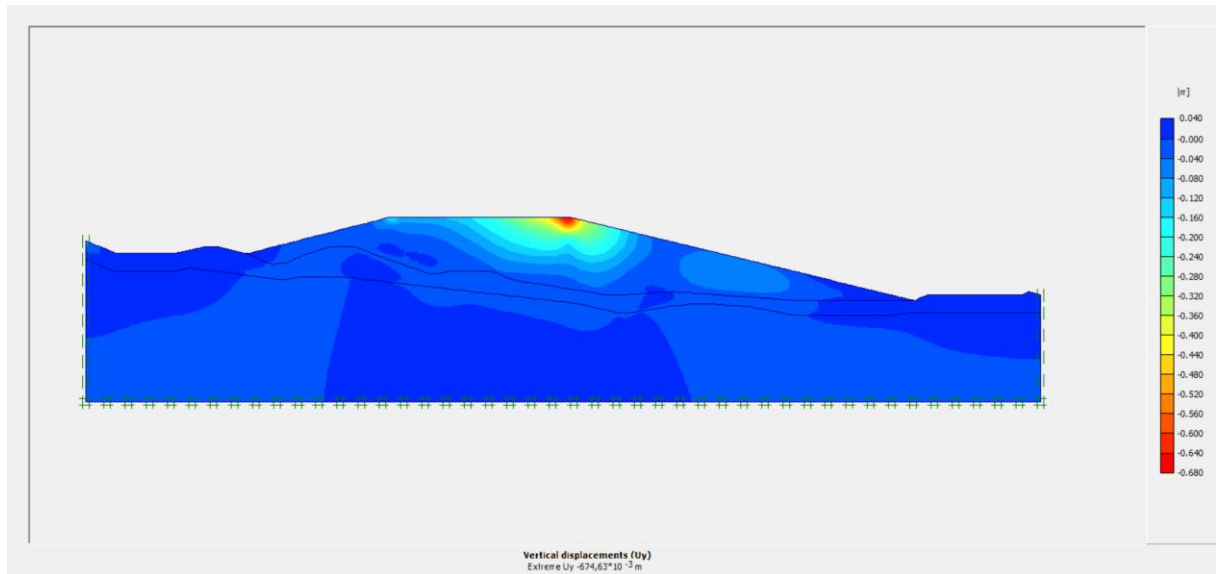
Fonte: Autor (2026)

Figura 65: Deslocamentos horizontais para GC=99% e NA crítico



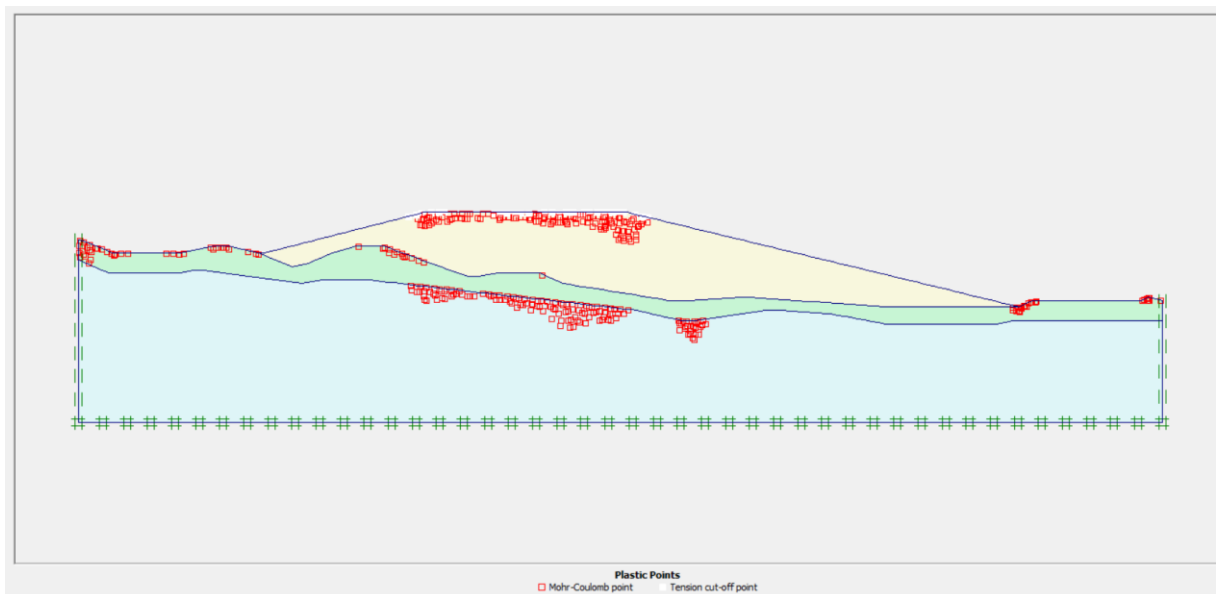
Fonte: Autor (2026)

Figura 66: Deslocamentos verticais para GC=99% e NA crítico



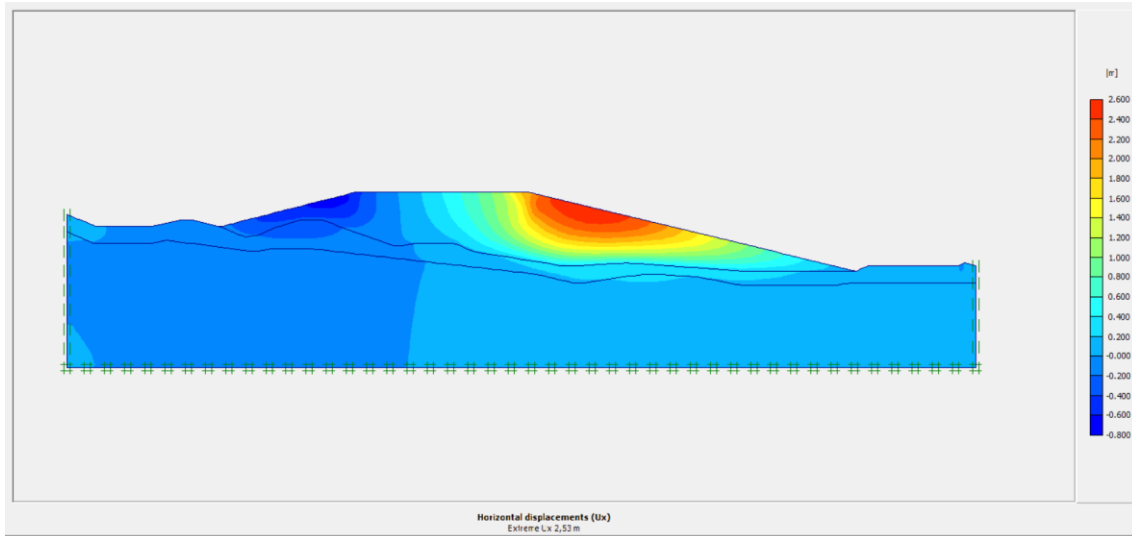
Fonte: Autor (2026)

Figura 67: Pontos de plastificação para GC=99% e NA crítico



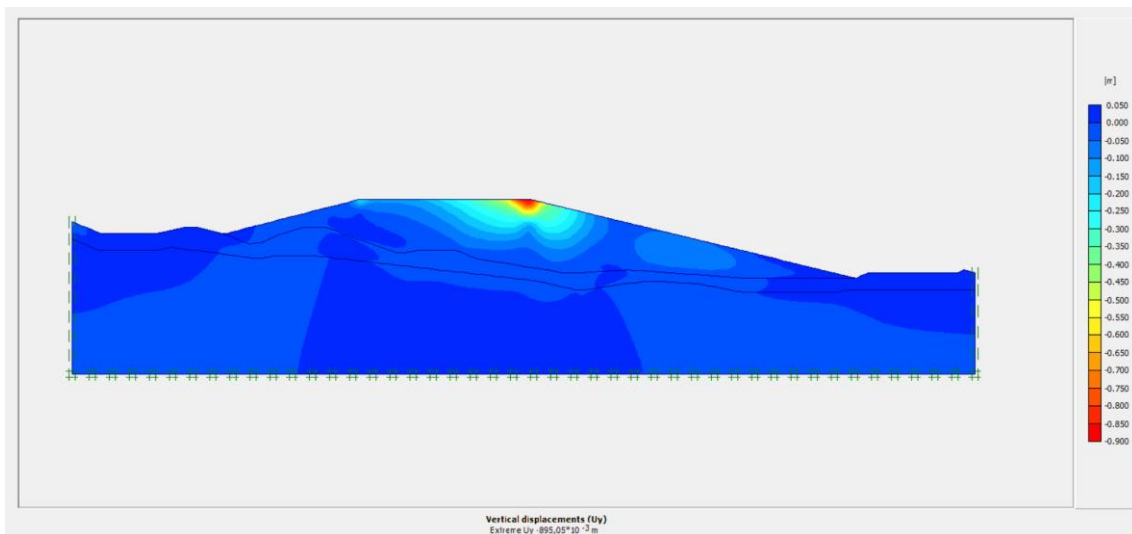
Fonte: Autor (2026)

Figura 68: Deslocamentos horizontais para GC=93% e NA crítico



Fonte: Autor (2026)

Figura 69: Deslocamentos verticais para GC=93% e NA crítico



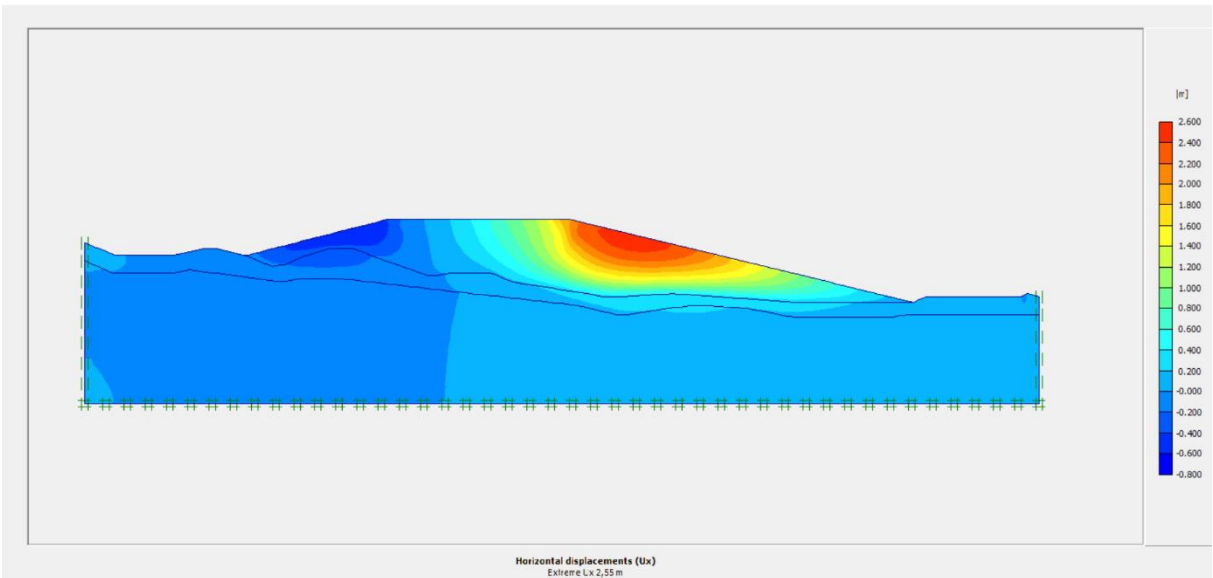
Fonte: Autor (2026)

Figura 70: Pontos de plastificação para GC=93% e NA crítico



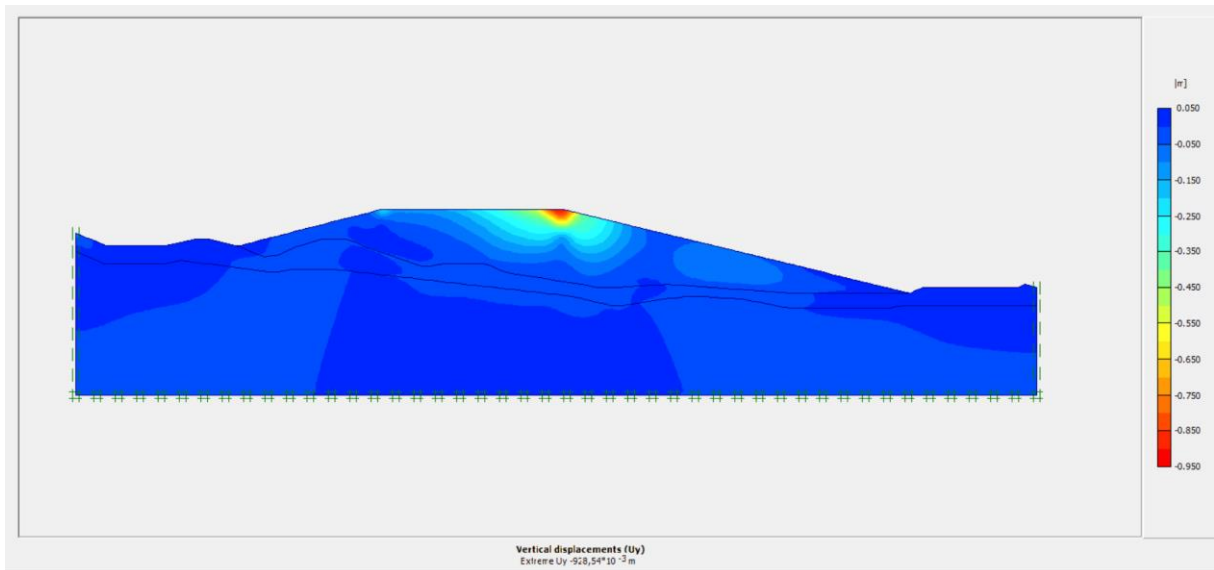
Fonte: Autor (2026)

Figura 71: Deslocamentos horizontais para GC=88% e NA crítico



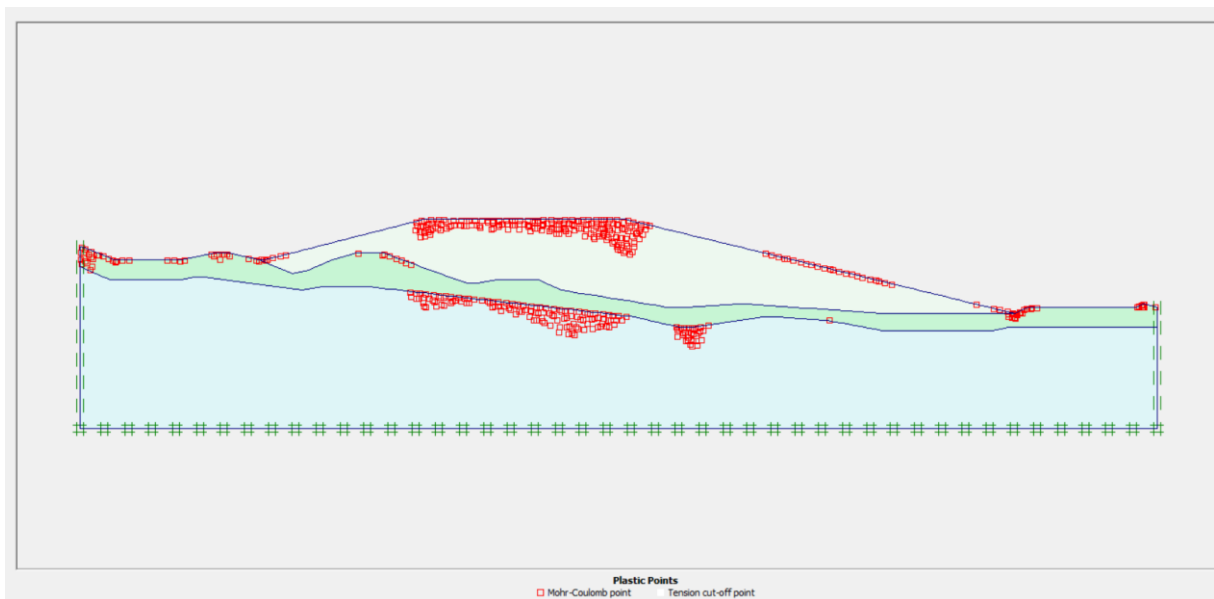
Fonte: Autor (2026)

Figura 72: Deslocamentos verticais para GC=88% e NA crítico



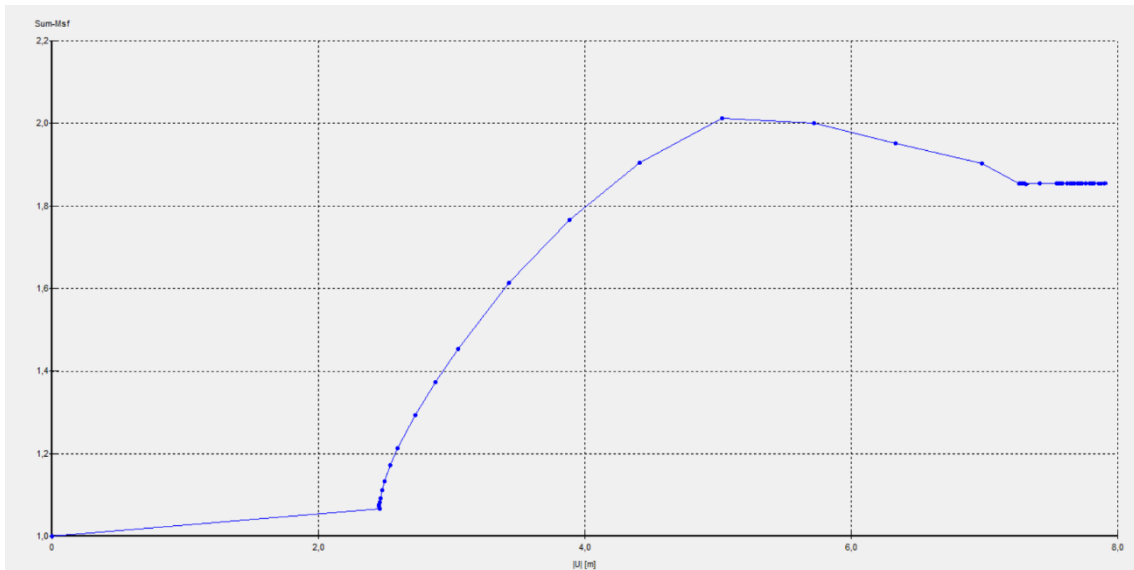
Fonte: Autor (2026)

Figura 73: Pontos de plastificação para GC=88% e NA crítico



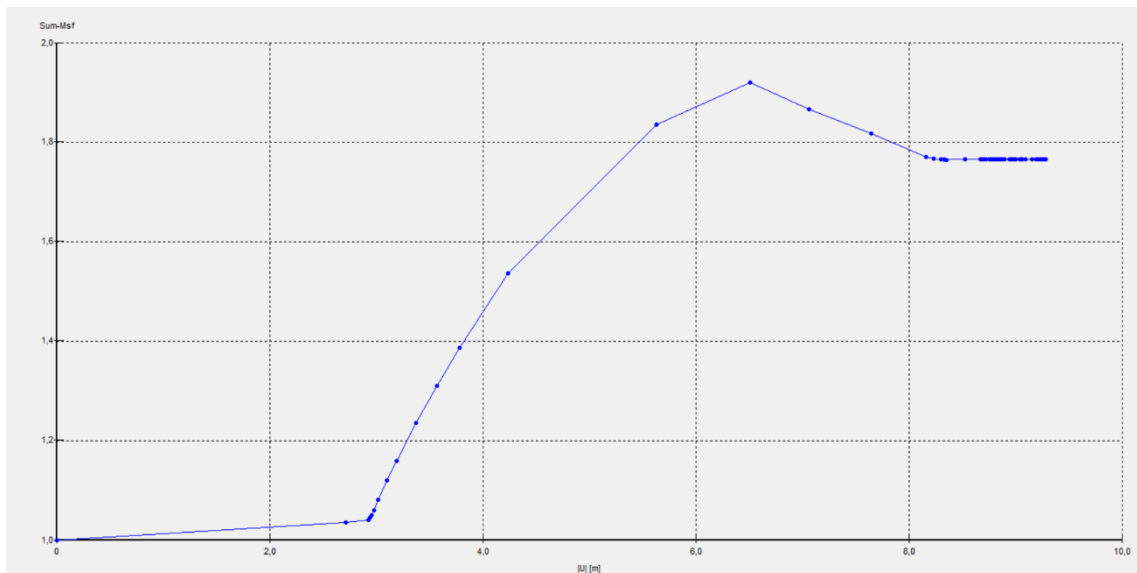
Fonte: Autor (2026)

Figura 74: FS para GC = 99% e NA normal



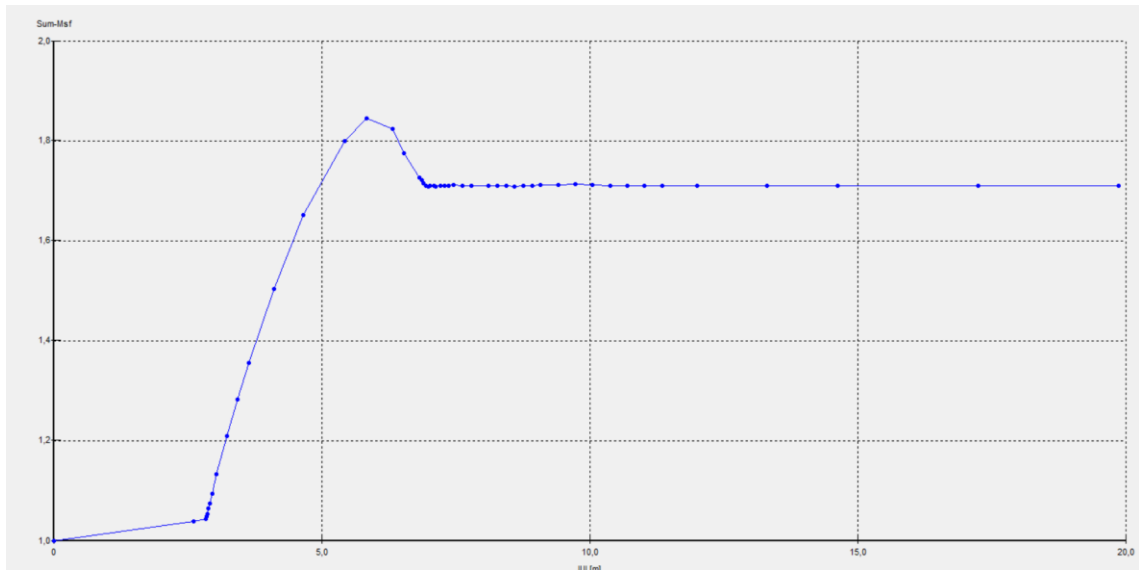
Fonte: Autor (2026)

Figura 75: FS para GC = 93% e NA normal



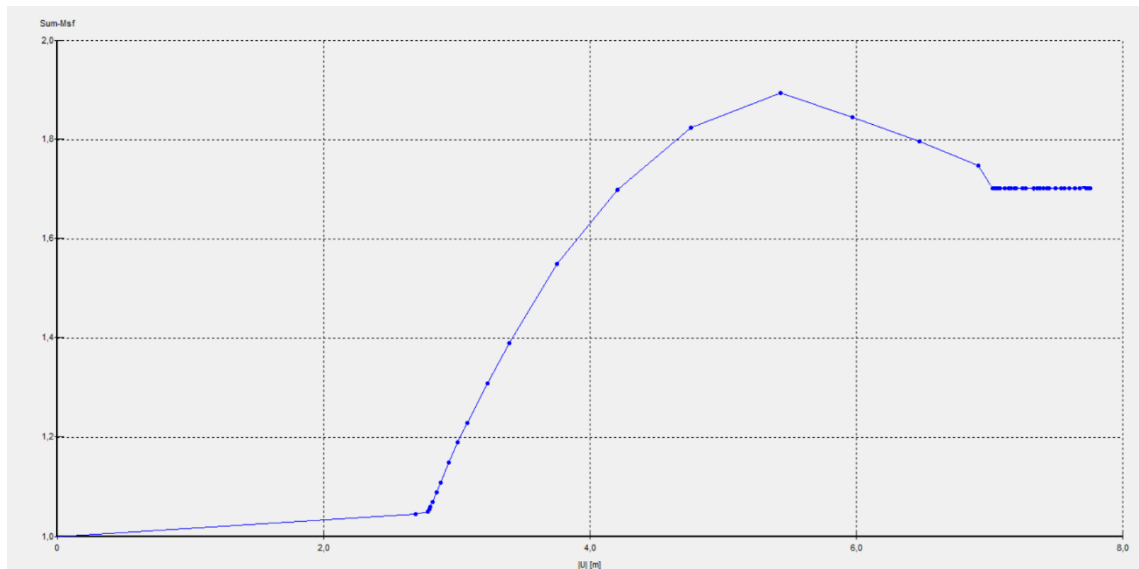
Fonte: Autor (2026)

Figura 76: FS para GC = 88% e NA normal



Fonte: Autor (2026)

Figura 77: FS para GC = 99% e NA crítico



Fonte: Autor (2026)

Figura 78: FS para GC = 93% e NA crítico

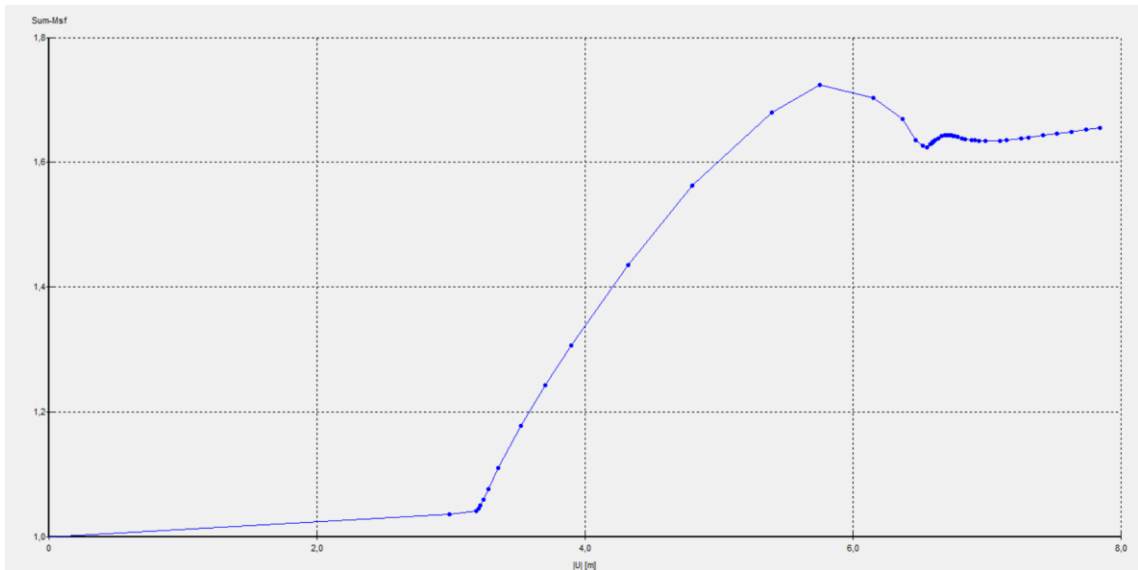
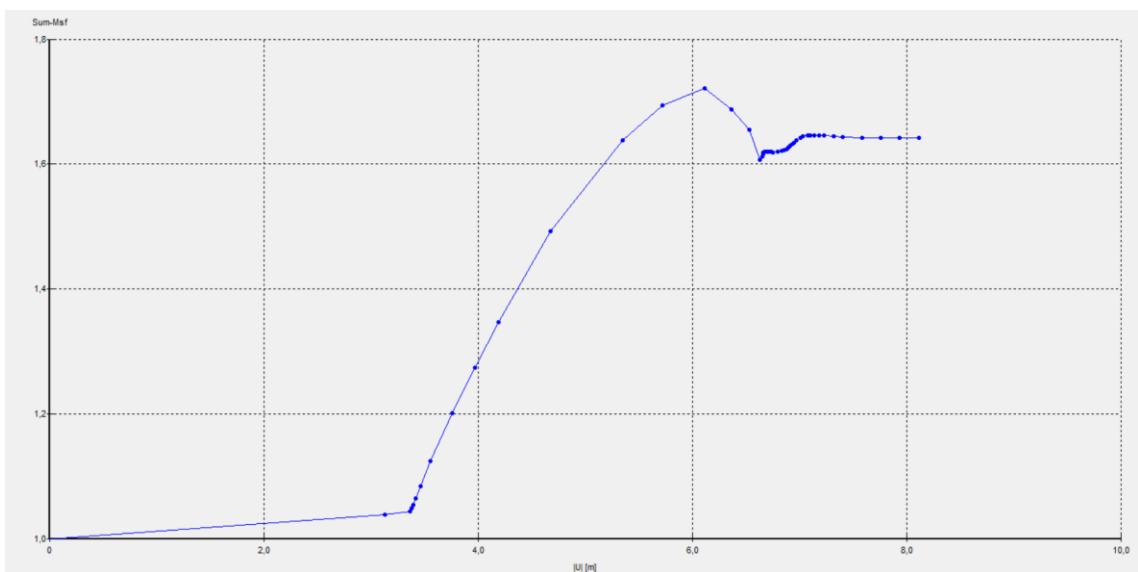


Figura 79: FS para GC = 88% e NA crítico



Fonte: Autor (2026)